

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITE



جامعة باجي مختار - عنابة

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

Thèse

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences

Option : Génie Civil

**ELABORATION DE COMPOSITES A BASE DE FIBRES NATURELLES DE LA
REGION AVEC DIFFERENTES MATRICES : COMPORTEMENT MECANIQUE ET
DURABILITE**

Présentée par :

Mr : GOUASMIA Naoui

Soutenue publiquement le 24/06/2026

Devant le jury composé de

BELOUETTAR Redjem	Pr	Université d'Annaba	Président
MERZOUZ Mouloud	Pr	Université d'Annaba	Rapporteur
BOUABAZ Mohamed	Pr	Université de Skikda	Examineur
HAMMOUM Hocine	Pr	Université de Tizi Ouzou	Examineur
BOUDJELLAL Khaled	MCA	Université de Skikda	Examineur
BENZERARA Mohammed	MCA	Université d'Annaba	Examineur

Remerciements

Cette recherche a été réalisée au sein du Laboratoire du département de Génie Civil de l'Université Badji Mokhtar d'Annaba.

J'adresse à ALLAH mes plus sincères remerciements et ma grande reconnaissance pour ses aides inestimables, pour lesquelles je ne saurais jamais assez le remercier.

Je tiens à remercier le Professeur Merzoud Mouloud directeur de thèse pour la confiance qu'il m'a accordée, pour ses conseils, ses encouragements sans relâche, également sa disponibilité son humilité, son soutien, sa gentillesse et son aide inestimable.

Mes sincères remerciements au président et aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à l'évaluation de cette recherche.

Je souhaiterai maintenant remercier l'ensemble de mes collègues enseignants chercheurs de l'université Badji Mokhtar d'Annaba, à ceux de l'université de Souk-Ahras, et ceux de l'Ecole Nationale des Ingénieurs de Tunis

Je remercie aussi l'ensemble de mes collègues des laboratoires de l'université Badji Mokhtar d'Annaba, et ceux de l'université de Souk-Ahras et ceux de l'ENIT de Tunis

Mr Gouasmia Naoui

Dédicaces

Je dédie ce travail de recherche scientifique à mon cher père,

À la mémoire de ma chère mère ;

À la mémoire de mon cher frère El Abed ;

Ainsi qu'à l'ensemble de mes frères Rachid, Taher, ma sœur et ma nièce.

J'adresse également cette dédicace à mon épouse et à mes enfants pour leur soutien inconditionnel et précieux.

Naoui Gouasmia

Table des matières

Résumé.....	9
Abstract	11
المُلخَص.....	13
Liste des figures	14
Liste des tableaux.....	19
Description des objectifs de la thèse	22
Introduction générale.....	24
Chapitre I.....	27
I. Etat de l’art sur les matrices, les renforts et les fibres.....	27
I.1.1. Concept général sur les matrices	28
I.1.2. Les matrices.....	28
I.1.3. Les matrices thermodurcissables.....	28
I.1.4. Les matrices thermoplastiques	29
I.1.5. Concept général sur les renforts	30
I.1.6. Les renforts.....	30
I.1.7. Concept sur les fibres incorporées dans les matériaux composites.....	31
I.1.8. Le renfort par les fibres naturelles.....	32
I.1.9. Fibres végétales	33
I.1.10. Problèmes liés à l'utilisation des fibres végétales comme renfort.....	34
I.1.11. Avantages et inconvénients des renforts par les fibres végétales.....	34
I.1.12. Concept sur les matériaux composites	35
I.1.13. Les composites	36
I.1.14. Composites à matrice cimentaire	37
I.1.15. Composites à base de chaux.....	38
I.1.16. Composites avec d’autres matrices	39
I.1.17. Composites à base de fibres végétales	39
I.1.18. Propriétés du renfort en fibres végétales	39
I.1.19. Propriétés et compatibilité de la matrice	40
I.1.20. Procédés de fabrication des composites	41
I.1.21. Propriétés mécaniques des composites végétaux	41
I.1.22. Techniques de mise en œuvre	42
I.1.23. Formulation des composites renforcés par des fibres végétales	43
I.1.24. Fabrication et mise en œuvre des bétons végétaux	43

I.1.25. Malaxage des constituants des composites végétaux fibrés.....	43
I.1.26. Conditions de cure des bétons végétaux	44
I.1.27. Impact du milieu cimentaire sur les fibres végétales	44
I.1.28. Choix des fibres végétales pour optimisation des performances des composites	45
I.1.29. Traitement des fibres.....	46
I.1.30. Modification de la matrice cimentaire	49
I.1.31. Concept sur les fibres et les fibres végétale	50
I.1.32. Fibres naturelles	50
I.1.33. Fibres naturelles d'origine animale	50
I.1.34. Fibres naturelles d'origine minérale.....	51
I.1.35. Fibres naturelles d'origine végétale	51
I.1.36. Composition chimique des fibres végétales (lignocellulosiques)	52
I.1.37. La cellulose	53
I.1.38. La lignine.....	54
I.1.39. L'hémicellulose.....	55
I.1.40. Les pectines	56
I.1.41. Sucres	57
I.1.42. Propriétés des fibres végétales	58
I.1.43. Disponibilité des fibres végétales en Algérie	60
I.1.44. Synthèse bibliographique sur l'incorporation des fibres végétales dans la construction	61
Chapitre II.....	63
II. Caractérisations, traitement et mode opératoire des matériaux utilisés	63
II.1. Caractérisations des matériaux.....	63
II.1.1. Matériaux utilisés pour renfort ; fibre d'Alfa et de Diss	63
II.1.2. Ciment	65
II.1.3. Composition chimique du ciment.....	66
II.1.4. Caractéristiques physico - mécaniques du ciment.....	66
II.1.5. L'argile et sa formation	67
II.1.6. Composition chimique de la Montmorillonite.....	68
II.1.7. Composition chimique de la Kaolinite	69
II.1.8. Caractéristiques physico – chimiques de la kaolinite et la montmorillonite	70
II.1.9. La Chaux.....	70
II.1.10. Composition chimique et caractéristiques physique de la Chaux.....	71

II.1.11.	Effet du contact de la chaux avec l'argile	72
II.1.12.	L'eau	73
II.1.13.	Eau de gâchage.....	73
II.1.14.	L'eau de mer	74
II.1.15.	Traitements et méthodes expérimentales	75
II.1.16.	Traitement des fibres.....	75
II.1.17.	Méthode et étapes expérimentales	76
II.1.18.	Dosage des sucres totaux par la méthode de phénol-acide sulfurique	77
II.1.19.	Principe	77
II.1.20.	Mode opératoire	77
II.1.21.	Méthode de formulation des bio-composites	77
II.1.22.	Elaboration des bio-composites et essais mécaniques	78
II.1.23.	Caractérisations par imagerie au microscope électronique à balayage MEB	80
II.1.24.	Concept du retrait.....	81
II.1.25.	Mesure du retrait des bio-composites cimentaires fibrés.....	81
II.1.26.	Perte de masse	82
Chapitre III		84
III. Résultats et discussion.....		84
I.1.45.		84
III.1.1.	Détermination des sucres solubles	84
III.1.2.	Détermination des masses volumiques des bio-composites cimentaires élaborés	86
III.1.3.	Détermination du retrait et de la perte de masse des différents bio-composites cimentaires élaborées.....	87
III.1.4.	Résultats de la perte de masse des bio-composites cimentaires élaborées.....	87
III.1.5.	Résultats du retrait des différents bio-composites cimentaires élaborés.....	90
III.1.6.	Résultats des essais mécaniques sur les bio-composites cimentaires des fibres bouillis pour différentes formulations	91
III.1.7.	Imageries en MEB des bio-composites cimentaires des fibres bouillies	93
III.1.8.	Résultats des essais mécaniques sur les bio-composites cimentaires à base de fibres immergées dans l'eau de mer à des différents âges.....	95
III.1.9.	Résistances à la flexion	95
III.1.10.	Résistances à la compression	97
III.1.11.	Imageries en MEB des bio-composites cimentaires des fibres immergées dans l'eau de mer	99

III.1.12. Récapitulatif des résultats des essais mécaniques appliqués sur des bio-composites cimentaires bio-fibrés dont les fibres sont soumises à des différents traitements	103
III.1.13. Résistance mécanique des bio-composites d'argile à base de fibres d'Alfa et de Diss traitées (bouillis) et non traitées.....	104
III.1.14. Résistances mécanique des bio-composites à matrice composée de 50% d'argile et 50% de chaux renforcés par de fibres d'Alfa et de Diss traitées (bouillis) et non traitées	107
III.1.15. Récapitulatif des résultats des essais mécaniques appliqués sur des bio-composites d'argile biofibrés dont les fibres sont soumises à des différents traitements ..	109
Chapitre IV	112
IV. Durabilité.....	112
IV.1.1. Longévité et résistance des composites fibrés immergés dans des milieux agressifs	112
IV.1.2. Résistances mécanique des bio-composites cimentaires renforcées par des fibres d'Alfa et de Diss traitées (bouillis) et non traitées immergés dans des milieux agressifs NaOH 5%	112
IV.1.3. Résistances mécanique des bio-composites cimentaires renforcées par des fibres d'Alfa et de Diss traitées (bouillis) et non traitées immergés dans des milieux agressifs en eau de mer	114
IV.1.4. Evaluation du comportement des bio composites cimentaires fibrée soumis dans des milieux agressifs.....	115
Conclusion générale	118
Perspectives envisagées.....	123
Bibliographie	126

➤ Résumé

Résumé

La valorisation des fibres végétales dans le secteur du bâtiment et du génie civil est un secteur important dans la mesure où les produits que l'on obtient ne sont pas soumis à des critères de qualité trop rigoureux. La récupération des déchets végétaux touche deux impacts très importants, l'impact environnemental et économique, puisque ces végétaux sont des ressources renouvelables chaque année et biodégradables, et ont l'avantage d'être disponibles en grande quantité et à faible coût.

Les matériaux cimentaires, par leur performance en termes de résistance mécanique et de durabilité dominant le marché des matériaux de construction. Ils restent pourtant perfectibles : leur capacité de déformation très limitée ainsi que leur faible résistance à la traction les rendent sensibles à la fissuration, notamment la fissuration de retrait empêché. A titre d'exemple, les dallages, les chaussées et plus généralement les éléments mis en place en grande surface se fissurent sous l'effet du retrait.

L'amélioration de la capacité de déformation des matériaux cimentaires ou autres sont donc un enjeu majeur, ces matériaux composites, renforcés de fibres naturelles rendent le matériau recherché très ductile, et à résistance à la traction qui avoisine la résistance à la compression.

Nous savons au préalable que les fibres végétales contiennent aussi un pourcentage important en sucres, qui interagit défavorablement avec la pâte de ciment, alors des traitements thermiques et d'enrobage sont nécessaires pour améliorer leurs caractéristiques d'interaction entre les fibres et leurs matrices.

L'utilisation d'autres matrices argileuses et/ou à chaux par exemple, interagissent mieux avec les fibres naturelles, nous permet d'avoir des composites plus économiques, qui ne nécessitent pas de traitements au préalable.

L'étude de la durabilité sur les fibres et sur les composites eux-mêmes, nous permet de déterminer les caractéristiques mécaniques des composites immergés dans l'eau douce ou saline à court à moyen et long terme.



Abstract

Abstract

The use of plant fibers in the building and civil engineering sector is important because the products obtained are not subject to overly stringent quality criteria. The recovery of plant waste has two very important impacts, environmental and economic, since these plants are renewable and biodegradable resources that are available in large quantities at low cost.

Cementitious materials dominate the construction materials market due to their mechanical strength and durability. However, there is stillroom for improvement: their very limited deformation capacity and low tensile strength make them susceptible to cracking, particularly restrained shrinkage cracking. For example, paving, road surfaces and, more generally, large-area elements crack under the effect of shrinkage.

Improving the deformation capacity of cementitious and other materials is therefore a major challenge. These composite materials, reinforced with natural fibers, make the desired material highly ductile, with tensile strength approaching compressive strength.

We know in advance that plant fibers also contain a significant percentage of sugars, which interact unfavorably with cement paste, so heat and coating treatments are necessary to improve the interaction characteristics between the fibers and their matrices.

The use of other clay and/or lime matrices, for example, interact better with natural fibers, allowing us to obtain more economical composites that do not require prior treatment.

The study of the durability of the fibers and the composites themselves allows us to determine the mechanical characteristics of composites immersed in fresh or salt water in the short, medium and long term.

ملخص ➤

تعد الاستفادة من الألياف النباتية في قطاع البناء والهندسة المدنية قطاعاً مهماً، حيث أن المنتجات التي يتم الحصول عليها لا تخضع لمعايير جودة صارمة للغاية. يؤثر استرداد النفايات النباتية على جانبيين مهمين للغاية، هما الجانب البيئي والجانب الاقتصادي، لأن هذه النباتات هي موارد متجددة كل عام وقابلة للتحلل البيولوجي، ولها ميزة توفرها بكميات كبيرة وبتكلفة منخفضة.

تسيطر المواد الإسمنتية على سوق مواد البناء بفضل أدائها من حيث المقاومة الميكانيكية والمتانة. ومع ذلك، فهي قابلة للتحسين: فقدرتها المحدودة جداً على التشوه ومقاومتها المنخفضة للشد تجعلها عرضة للتشقق، ولا سيما تشقق الانكماش. على سبيل المثال، تتشقق البلاطات والطرق وبشكل عام العناصر الموضوعة على مساحات واسعة تحت تأثير الانكماش.

لذلك، فإن تحسين قدرة مواد الإسمنت وغيرها على التشوه يمثل تحدياً كبيراً، حيث أن هذه المواد المركبة، المدعمة بالألياف الطبيعية، تجعل المادة المطلوبة شديدة الليونة، ومقاومة الشد فيها تقارب مقاومة الضغط.

نحن نعلم مسبقاً أن الألياف النباتية تحتوي أيضاً على نسبة كبيرة من السكريات، التي تتفاعل بشكل سلبي مع عجينة الإسمنت، لذا فإن المعالجات الحرارية والطلاء ضرورية لتحسين خصائص التفاعل بين الألياف ومصفوفاتها.

إن استخدام مصفوفات أخرى من الطين و/أو الجير على سبيل المثال، تتفاعل بشكل أفضل مع الألياف الطبيعية، مما يتيح لنا الحصول على مركبات أكثر اقتصادية، لا تتطلب معالجات مسبقة.

تتيح لنا دراسة متانة الألياف والمركبات نفسها تحديد الخصائص الميكانيكية للمركبات المغمورة في المياه العذبة أو المالحة على المدى القصير والمتوسط والطويل.



Liste des figures

Liste des figures

Figure 1: Classification des renforts selon leur nature	31
---	----

Figure 2: Structure d'un matériau composite	36
Figure 3: Classification des différents types de matériaux composites (Callister, 2001)	37
Figure 4: Classification des fibres naturelles	50
Figure 5: Classification des fibres naturelles d'origine végétale	52
Figure 6: structure et composition d'une paroi végétale (Ritter, 2008).....	53
Figure 7: Structure de la cellulose (Sharma et al. 2013)	54
Figure 8: (A), Structure de la lignine. (B), modèle moléculaire de la lignine dérivée du bois (Liu et al. 2015).....	55
Figure 9: Le bleu : les β -D-glucanes, le rouge : l' α -D-xylose, le noir : l' α -D-galactose et le marron : les résidus de α -L-fucose (Villarreal et al. 2012)	56
Figure 10: Représentation de la chaîne de la molécule de pectine.....	57
Figure 11: Présentation (A) de principe de la structure (Hearle, 1963) et (B) d'unemicrostructure (Baley, 2002) d'une fibre végétale	59
Figure 12: Plantes végétales d'Alfa (<i>Stipa tenacissima</i>) du Diss (<i>Ampelodesma mauritanica</i>), à l'état naturel de la région de Souk Ahras/Algérie.	63
Figure 13 : Touffes d'Alfa et de Diss, Tige d'Alfa de Diss naturel vue microscope optique. .	64
Figure 14 : présentation des fibres d'Alfa et de fibres de Diss après le broyage.	64
Figure 15: Vue à la microscopie électronique de fibre bouillie (d'Alfa et Diss) agrandissement $\times 800$	64
Figure 16: Vue d'un microscope optique d'une coupe histologique transversale d'une tige d'Alfa et une tige de Diss	65
Figure 17: photo des fibres d'Alfa et d'argile broyée employés pour la fabrication des briques et des tuiles.	68
Figure 18: Photo en MEB et représentation schématique de la structure de la montmorillonite	69
Figure 19: Photo en MEB et représentation schématique de la structure de la kaolinite.....	69
Figure 20 : cycle de la chaux.....	71
Figure 21: Différentes étapes essentielles d'élaboration des composites	76
Figure 22: Essais de flexion sur les bio-composites fibrés (Zwick/Roell KN 20).	79
Figure 23: Essais de flexion sur l'étalon en ciment (Zwick/Roell 20 KN).	79
Figure 24: Presse universelle BeraTest 2000 KN).	79
Figure 25: MEB Quanta 250 et schématisation du mode de fonctionnement.....	80
Figure 26: Mise en place des échantillons sur le platine porte-objet du MEB.....	80
Figure 27: système d'acquisition et de traitement des informations du MEB.	81
Figure 28 : Mesures du retrait	82

Figure 29 : Rétractomètre pour la mesure du retrait	82
Figure 30 : Courbe d'étalonnage de glucose (méthode de Dubois et al. 1956)	84
Figure 31: Histogramme comparatif des masses volumique des composites étudiés.....	86
Figure 32: Courbe des variations de la masse des bio-composites cimentaires renforcés par des différents volumes des fibres d'Alfa.....	87
Figure 33: Courbe des variations de la masse des bio-composites cimentaires renforcés par des différents volumes des fibres de Diss	88
Figure 34: Histogramme comparatif des variations de la masse des bio-composites cimentaires renforcés par des différents volumes des fibres d'Alfa	89
Figure 35: Histogramme comparatif des variations de la masse des bio-composites cimentaires renforcés par des différents volumes des fibres de Diss.....	89
Figure 36: Courbes de retrait des bio-composites cimentaires renforcés par des différents volumes des fibres d'Alfa	90
Figure 37: Courbes de retrait des bio-composites cimentaires renforcés par des différents volumes des fibres de Diss.....	91
Figure 38: Résistance à la flexion et à la compression des bio-composites fibrés à base d'Alfa	92
Figure 39: Résistance à la flexion et à la compression des bio-composites fibrés à base de Diss	92
Figure 40: Images au MEB de la surface de contact d'une fibre de composite d'Alfa naturel broyé /ciment, agrandissement x 2000/4000.....	93
Figure 41: Images au MEB de la surface de contact d'une fibre de composite d'Alfa bouilli /ciment, agrandissement x 2000/4000.....	93
Figure 42: Images au MEB de la surface de contact d'une fibre de composite de Diss naturel broyé/ciment, agrandissement x 1000	94
Figure 43: Images au MEB de la surface de contact d'une fibre de composite de Diss bouilli /ciment, agrandissement x 1000/2000	95
Figure 44: Résistances à la flexion des bio-composites à base de fibres immergés dans l'eau de mer.....	96
Figure 45: Courbes contrainte à la flexion des bio-bio-composites à base de fibres de Diss immergés dans l'eau de mer pendant 30 jours	96
Figure 46: Courbes contrainte à la flexion des bio-composites à base de fibres d'Alfa immergés dans l'eau de mer pendant 30 jours	97
Figure 47: Résistances à la compression des bio-composites à base de fibres immergées dans l'eau de mer.....	98

Figure 48: Images au MEB de la surface de contact d'une fibre de composite d'Alfa immergée en eau de mer 30J/ciment, agrandissement x 2000/4000	99
Figure 49: Images au MEB de la surface de contact d'une fibre de composite d'Alfa immergée en eau de mer 60J/ciment, agrandissement x 2000/4000	99
Figure 50: Images au MEB de la surface de contact d'une fibre de composite d'Alfa immergée en eau de mer 90J/ciment, agrandissement x 2000/4000	100
Figure 51: Images au MEB de la surface de contact d'une fibre de composite d'Alfa immergée en eau de mer 120J/ciment, agrandissement x 2000/4000	100
Figure 52: Images au MEB de la surface de contact d'une fibre de composite Diss immergée en eau de mer 30J/ciment, agrandissement x 2000/4000	101
Figure 53: Images au MEB de la surface de contact d'une fibre de composite Diss immergée en eau de mer 60J/ciment, agrandissement x 2000/4000	101
Figure 54: Images au MEB de la surface de contact d'une fibre de composite Diss immergée en eau de mer 90J/ciment, agrandissement x 2000/4000	102
Figure 55: Images au MEB de la surface de contact d'une fibre de composite Diss immerger en eau de mer 120J/ciment, agrandissement x 2000/4000	102
Figure 56: Résistances mécanique des bio-composites d'argile à base de fibres d'Alfa traitées et non traitées	104
Figure 57: Résistances mécanique des bio-composites d'argile à base de fibres de Diss traitées et non traitées	105
Figure 58 : .Diagrammes Contraintes-déformations des composites d'argile renforcés par des fibres d'Alfa broyé bouilli.....	106
Figure 59 : Diagrammes Contraintes-déformations des composites d'argile et de chaux renforcés par des fibres de Diss broyé non traité	106
Figure 60: Résistances mécanique des bio-composites (50% d'argile et 50% de chaux) renforcés par de fibres d'Alfa traitées et non traitée.	107
Figure 61: Résistances mécanique des bio-composites (50% d'argile et 50% de chaux) renforcés par de fibres de Diss traitées et non traitées	107
Figure 62 : .Diagrammes Contraintes-déformations des composites d'argile et de chaux renforcés par des fibres d'Alfa broyé non bouilli	108
Figure 63: Diagrammes Contraintes-déformations des composites d'argile et de chaux renforcés par des fibres de Diss broyé non bouilli	109
Figure 64: Des bio-composites cimentaires renforcées par des fibres d'Alfa et de Diss traitées (bouillis) et non traitées immergés dans l'eau de mer et dans NaOH 5%.....	112

Figure 65: Résistance à la flexion et à la compression des bio-composites renforcés par les fibres de Diss immergé en NaOH pendant 30 jours.....	113
Figure 66: Résistance à la flexion et à la compression des bio-composites renforcés par les fibres d'Alfa immergé en NaOH pendant 30 jours.	113
Figure 67: Résistance à la flexion et à la compression des bio-composites renforcés par les fibres de Diss immergés en Eau de mer pendant 30 jours.	114
Figure 68: Résistance à la flexion et à la compression des bio-composites renforcés par les fibres d'Alfa immergés en eau de mer pendant 30 jours.....	114

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques des matrices thermodurcissables (Gay, 1997)	29
Tableau 2: Caractéristiques des matrices thermoplastiques (Gay, (1997)	29
Tableau 3: Les principales différences entre les matrices (Shaoxiong, 2012)	30

Tableau 4: Avantages et inconvénients des fibres végétales utiliser comme renfort (Carma, 2006).....	35
Tableau 5: Propriétés mécaniques de certains composites végétaux (Akkaoui,2014).....	42
Tableau 6: des études de comportement de fibres immergées dans des différentes solutions alcalines	44
Tableau 7: Quelques études rapporté sur différents traitements appliqués sur les fibres végétales	46
Tableau 8: Composition chimiques de certaines fibres naturelles. (Dittenber <i>et al.</i> 2012)	58
Tableau 9: Propriétés physiques et mécaniques en traction de différentes fibres végétales (Dittenber <i>et al.</i> 2012 ; Maya Jacob John <i>et al.</i> 2008 ; Arrakhiz <i>et al.</i> 2012 ; Tan <i>et al.</i> 1997)	59
Tableau 10: Masse volumique des fibres d’Alfa et de Diss	65
Tableau 11: Composition chimique et minéralogique de Matine (Fiche technique)	66
Tableau 12: Caractéristiques physico - mécaniques du ciment (Résultats des tests appliqués au laboratoire)	66
Tableau 13: Caractéristiques physico - mécaniques du ciment NA 442 (Fiche technique de ciment MATINE) (www.lafargealgerie.com).	67
Tableau 14: Caractéristiques physico - chimiques de la kaolinite et la montmorillonite (Bouabid et al. 2016).....	70
Tableau 15: Masse volumique de l’argile utilisée (Résultats des tests appliqués au laboratoire)	70
Tableau 16: La composition chimique de la Kaolin et la Montmorillonite (Bouabid et al. 2016).....	70
Tableau 17: Composition Chimique de la chaux (d’après la fiche technique jointe établie par le constructeur) (www. cevital-minerals.com).	71
Tableau 18: Caractéristiques physiques de la chaux éteinte utilisée (fiche technique joint établie par l’usine Cevital minerals d’El Khroub – Constantine) (www. cevital-minerals.com).	72
Tableau 19: Composition chimique de l’eau du robinet réseau de la région de Souk-Ahras ..	73
Tableau 20: Composition physico-chimiques de l'eau de mer de la région d'Annaba (baie d'Annaba et littoral d'Annaba).....	74
Tableau 21: formulations des bio-composites.....	78
Tableau 22: Concentration de sucres solubles dans les échantillons étudiés d’Alfa	84
Tableau 23: Concentration de sucres solubles dans les échantillons étudiés de Diss	85

Tableau 24: récapitulatif des résultats des essais mécaniques appliqués sur des bio-composites cimentaires biofibrés dont les fibres sont soumis à des différents traitements :	104
Tableau 25: récapitulatif des résultats des essais mécaniques appliqués sur des bio-composites d'argile biofibrés dont les fibres sont soumis à des différents traitements :	110
Tableau 26: Regroupement des résultats des essais mécaniques appliqués sur des bio-composites cimentaires biofibrés immergés dans des milieux agressifs et ceux non soumis à un milieu agressif	115

➤ Description des objectifs de la thèse

Description des objectifs de la thèse

Notre recherche vise à valoriser les ressources naturelles locales à l'état sauvage ou des déchets de l'agriculture biodégradables et économiques par l'incorporation de leurs fibres dans des différentes matrices (ciment, argile, chaux etc.), pour élargir l'utilisation de ces matériaux renouvelable dans le secteur de la construction. Généralement ces agrégats traditionnels (sable,

le gravier..., etc.) qui sont des ressources non renouvelables, qui nuisent à la nature et aussi leur coût de revient présente une charge économique et onéreuse lors de l'utilisation et de même pour l'élimination où le recyclage en fin de vie de ces matières.

Cette approche proposée nécessite l'étude approfondie, qui se concrétise par :

La détermination des composants chimiques, lignocellulosiques et minéraux renfermés dans ces fibres.

- D'aborder des études de caractérisation sur les fibres (résistance à la traction, résistance à l'arrachement et essais de retrait).
- Des formulations doivent alors être choisies, en faisant varier les pourcentages de fibres et du rapport E/C pour déterminer la composition optimale, qui offre les meilleures performances mécaniques.
- L'utilisation des diverses matrices qui répondent à diverses performances des composites obtenus.

L'étude de la durabilité sera établie en faisant immerger les fibres et les différents composites obtenus dans de l'eau saline et dans d'autres solutions pour en déterminer les caractéristiques mécaniques des composites obtenus à différents âges.



Introduction générale

Introduction générale

La découverte et l'invention du béton depuis le 18^{ème} siècle était un développement de grande valeur au domaine de la construction sur plusieurs volets notamment ; sur sa résistance à la compression, sa durabilité et pour sa conservation de l'environnement et ceci malgré sa

faible résistance à la traction qui présente presque 1/10 de sa résistance à la compression. Afin d'améliorer la résistance à la traction, plusieurs recherches ont été consacrées au renforcement jusqu'à l'invention du composite en béton et en béton armé, au début du 20ème siècle. Avec le développement de la construction et l'orientation humaine vers la diminution du coût de revient de la réalisation des constructions ainsi que celle du recyclage en fin de vie. Les recherches scientifiques ont été condensées vers cette approche « le développement et l'amélioration des caractéristiques physiques et mécaniques ». Plusieurs études ont porté sur le renforcement de la pâte de ciment par des matières qui ont amélioré la résistance et la durabilité mais avec un impact négatif sur l'environnement et avec un coût de recyclage trop élevé tel que l'amiante. D'autres chercheurs ont utilisé des renforts plus écologiques tels que la fibre de verre et de carbone mais qui restent énergivore par rapport aux fibres végétales.

Cependant, ces dernières décennies, des recherches scientifiques ont visé à améliorer les caractéristiques physiques et mécaniques du composite cimentaire dans le cadre du respect de l'environnement tout en diminuant le coût de l'exploitation de cette substance ainsi que son coût de recyclage et ceci par l'intégration des fibres végétales qui possèdent des propriétés intrinsèques très intéressantes comme renfort dans la matrice cimentaire.

Cette contribution scientifique propose une alternative dans le cadre du thème des composites cimentaires fibrés afin d'améliorer les caractéristiques physiques et mécaniques notamment la résistance à la traction par flexion et cela par l'élaboration des composites renforcés par des fibres végétales tel que les fibres d'Alfa et de Diss. Nous tenons aussi à travers notre contribution scientifique à respecter de nombreux facteurs tel que le facteur économique et écologique qui conditionnent l'élaboration des composites renforcés par des fibres végétales. Ceci est dans un souci de respect de l'environnement grâce à l'utilisation des fibres naturelles. Dans ce contexte nous allons commencer notre travail de recherche par :

Le premier chapitre qui s'intitule « état de l'art » sera consacré sur l'étude bibliographique des fibres, des matrices, et les composites fibrés, elle porte à synchroniser entre les études qui ont été réalisées dans le domaine des composites fibrés en général. D'un côté nous allons explorer les domaines d'utilisation des composites fibrés, ainsi que les différentes formulations utilisées, et d'un autre côté nous allons nous pencher sur les études sur les composites synthétiques avec leurs différents traitements adoptés.

Le deuxième chapitre, intitulé "Matériaux utilisés, méthodes expérimentales et analyse des résultats", comprend deux sections. La première décrit les matériaux entrant dans la composition des biocomposites à fibres (ciment, argile, fibres végétales et autres additifs). Il traite également des facteurs influençant leur comportement mécanique, leurs propriétés physiques et leur durabilité, notamment l'impact de l'eau de mer et du NaOH.

Cette même section présente aussi les équipements utilisés dans les expériences appliquées sur ces matériaux composites à base de fibres naturelles.

La deuxième section est consacrée aux différents traitements et méthodes d'application des renforts naturels. Il explique également les méthodes de formulation des composites, les procédés de fabrication et les techniques de caractérisation.

Le troisième chapitre présente les résultats expérimentaux (illustrés par des histogrammes) obtenus à partir des tests réalisés en laboratoire appliqués sur les biocomposites renforcé par les fibrée naturel (Alfa et Diss) à base de matrice de ciment, d'argile et à base de matrice d'argile et de chaux.

Le quatrième chapitre, intitulée "Longévité, conclusion générale et perspectives", commence par un récapitulatif des résultats des essais mécaniques précédemment obtenus. Elle inclut également une étude de la durabilité des matériaux, avec des résultats des essais de résistance en flexion et en compression appliqués aux biocomposites cimentaires après immersion dans des solutions agressives (eau de mer, NaOH). Ce manuscrit se termine par une conclusion générale et des perspectives pour les recherches futures.



Premier chapitre

Chapitre I

I. Etat de l'art sur les matrices, les renforts et les fibres

Nous avons initié le premier chapitre par une synthèse bibliographique des recherches réalisées sur les fibres intégrées dans des différentes matrices pour la formulation des composites fibrés. Nous avons exploré les types, la composition et les caractéristiques des

matrices et également, les différents types possibles de plantes intégrées dans la composition des composites pour l'amélioration de leurs caractéristiques mécaniques.

Dans ce même chapitre nous avons aussi élaboré une synthèse bibliographique dans le domaine de la durabilité des composites à court et à long terme et même après avoir été immergées dans des milieux agressifs.

I.1.1. Concept général sur les matrices

Introduction

Dans cette section, nous aborderons la phase séquentielle qui garantit la cohésion, la transmission et la distribution des contraintes, tout en offrant une protection au renfort contre les agressions extérieures, à savoir la matrice. Nous examinerons également les différents types de matrices, les propriétés physico mécaniques, leurs avantages et inconvénients, ainsi que leurs domaines d'application.

I.1.2. Les matrices

La matrice est une matière liquide qui rentre dans la composition principale du composite, c'est la phase continue qui assure la cohésion, disperse les contraintes, protège le renfort, elle répartit les charges agissant sur le matériau, transmet les efforts mécaniques au renfort et donne au composite la forme souhaitée. Il existe des matrices qui sont utilisées pour des applications spécifiques, telles les alliages qui sont des matrices en métal et en céramique.

Les deux grandes familles de matrices les plus utilisées sont les matrices thermodurcissables et les matrices thermoplastiques (Marzano *et al.* 2014).

I.1.3. Les matrices thermodurcissables

C'est un polymère constitué d'un réseau tridimensionnel réticulé par des doubles liaisons polymérisées qui durcissent par une réaction exothermique irréversible en présence d'un catalyseur avec dégagement de chaleur. Il s'agit de la famille de résines, généralement sont utilisées pour l'élaboration des composites (applications aéronautiques hautes performances) en raison de leur excellente résistance à la fatigue, à la corrosion et à la chaleur et surtout de la facilité de moulage et de manipulation de ces résines (Saidane, 2014). Parmi les résines les plus couramment utilisées dans cette classe sont : les polyesters insaturés, les esters vinyliques, les résines époxy et les résines phénoliques. Cette famille présente l'inconvénient de ne pouvoir être recyclée que par lots (Pascault *et al.* 2002). Comme il est présenté sur le tableau 1 les matrices les plus utilisées détiennent un haut module d'élasticité contrairement pour l'Uréthane et leur température de mise en œuvre s'étend sur une large gamme tandis

qu'elle est faible pour d'autre cas, et cela limite leurs utilisation dans des applications d'une température élevée.

Tableau 1: Caractéristiques des matrices thermodurcissables (Gay, 1997)

Matrice thermodurcissable	Densité ρ	Module d'Young E(GPa)	Contrainte à la rupture σ_r (MPa)	Température maximale d'utilisation Tmax (°C)
Époxyde	1,2	4,5	130	90-200
Uréthane	1,1	0,7-7	30	100
Polyester insaturé	1,2	4	80	60-200
Urée Formaldéhyde	1,2-1,5	6-10	40-80	140
Phénol Formaldéhyde	1,1-1,3	3-4	35-60	80-300

I.1.4. Les matrices thermoplastiques

La matrice thermoplastique est constituée de polymères linéaires, les chaînes de ce type de résine glissent les unes sur les autres par l'augmentation de la température, (Gehring, 2013). Cette résine adhère en se refroidissant. En fait, cette réaction est réversible et peut être effectuée plusieurs fois sans dégrader ni altérer les propriétés du polymère. Les principales matrices thermoplastiques sont le polyamide, le polyéthylène, le polypropylène, etc. (Ragoubi, 2010).

Comme il est présenté sur le tableau 2, les propriétés de la matrice thermoplastique (module d'élasticité) sont nettement inférieures à celles relatives aux résines thermodurcissables, tandis que la température de mise en œuvre demeure légèrement supérieure (140 à 270°C), (Ragoubi, 2010).

Tableau 2: Caractéristiques des matrices thermoplastiques (Gay, (1997)

matrices thermoplastique (Polymère)	Température de transition vitreuse Tg (°C)	température de fusion Tf (°C)	Densité ρ (g/cm³)	σ_r (MPa)	E (GPa)
Polypropylène à l'État semi cristallin (PP)	5	165	0,92	30	1,2

Acide poly lactique (PLA)	50-60	150	1,25	40-60	3-4
Polyéthylène à haute densité (HDPE)	-100	134	0,95	28	1,1
Polychlorure de vinyle amorphe (PVC)	75-105	160-220	1,39	58	2,9
Polystyrène à l'état amorphe (PS)	90-100	-	1,05	55	3,2
Polyéthylène téréphtalate semi cristallin (PET)	70	255-265	1,30	47	2,6
Acrylonitrile butadiène styrène à l'état amorphe(ABS)	90-120	-	1,05	50	2,5

La différence fondamentale entre Les deux familles de matrices (thermodurcissables et les thermoplastiques) est le type de « fixation ».

Tableau 3: Les principales différences entre les matrices (Shaoxiong, 2012)

Matrice	Thermoplastique TP	Thermodurcissable TD
Etat de stockage	Solide prêt à l'emploi	Liquide visqueux à polymériser
Stockage	Illimité	Réduit
Mouillabilité	Difficile	Aisée
renforts	Chauffage refroidissement	Chauffage continu
Moulage	Court	Long
Cycle	Assez bonne	Limitée
Tenue au choc	Réduite	Bonne
Tenue thermique	Recyclables	Perdus ou recyclés en charges
Chutes et déchets	Propreté	Emanation pour « méthode humide»
Condition de travail		

I.1.5. Concept général sur les renforts

Cette section présente les renforts dans les composites, soulignant l'importance des fibres pour améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux dans laquelle ils sont incorporés. Elle met en avant les avantages des renforts d'origine naturelle.

I.1.6. Les renforts

Les renforts sont des éléments discontinus qui assurent le rôle de l'armature dans le composite ce qui confèrent la rigidité, résistance aux chocs, une bonne résistance à la traction, mais moins bonnes en compression, en flexion ou en cisaillement. Les études sur l'effet de la structure, de la texture et la géométrie du renfort sur les propriétés du composite ont pour objectifs, de créer une structure appropriée au besoin (Carma, 2006).

Les renforts d'origine naturelle sont des matériaux renouvelables et neutres en carbone qui peuvent conférer des propriétés de renforcement aux composites. Les renforts d'origine naturelle offrent des avantages écologiques et peuvent remplacer les matériaux plastiques à base de pétrole. La figure 1 présente la classification des renforts selon leur nature (Ben mlik, 2016).

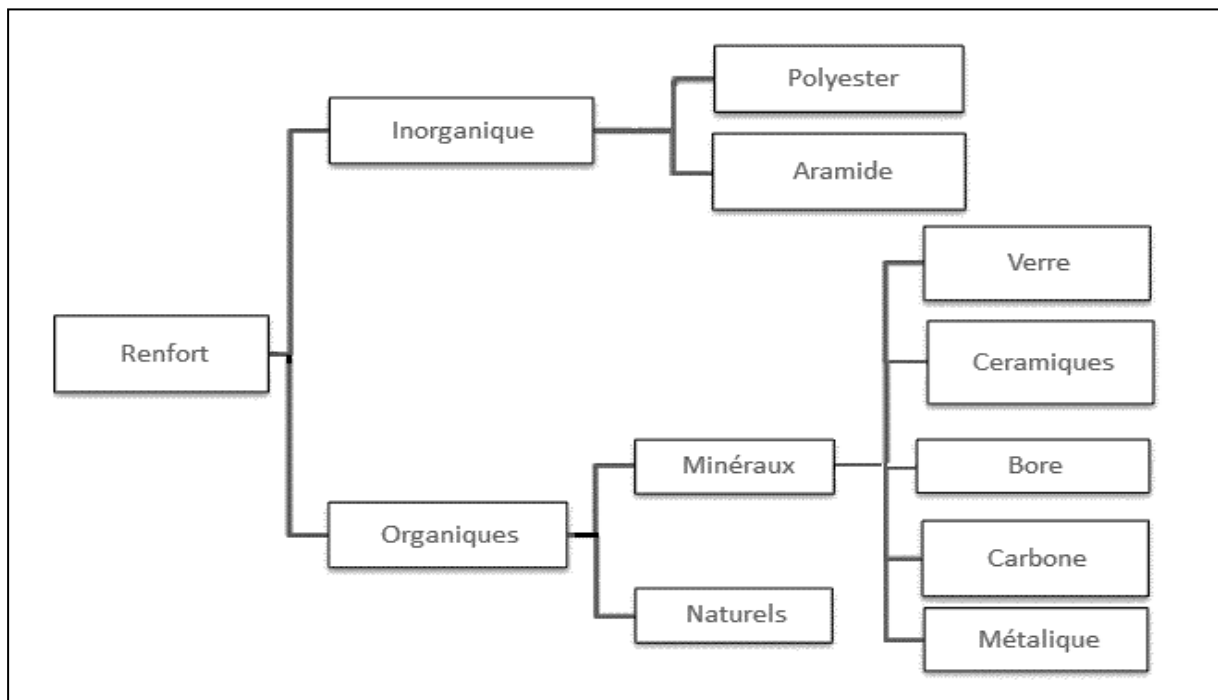


Figure 1: Classification des renforts selon leur nature

Les renforts en fibres en fonction du coût requis à travers leurs utilisations dans le domaine de la construction sont largement disponibles et se présentent d'une forme linéaires (fils, rovings), surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelles (tresses, tissus complexes, tissages tridirectionnels ou plus).

I.1.7. Concept sur les fibres incorporées dans les matériaux composites

L'incorporation par l'ajout du renfort sous forme de fibres a toujours pour but de supporter les efforts transmis par la matrice et confère aux composites une amélioration des propriétés mécaniques (rigidité, résistance à la rupture, dureté) et physiques (comportement thermique, résistance au feu, résistance à l'usure, tenue aux chocs, résistance aux rayons ultraviolet, etc.) (Gornet, 2008). L'utilisation facile avec des propriétés mécaniques élevées à faible densité et à moindre coût est la qualité recommandée des fibres de renfort pour

composites (Berthelot, 2013). Les renforts naturels dans les composites sont des matériaux renouvelables et neutres en CO₂ et agissent comme charge pour réduire la consommation de matières pétrochimiques en matières plastiques de base (Nyström, 2007).

Plusieurs types de fibres sont disponibles sur marché en fonction de leurs coûts de revient. Malgré certains inconvénients, les fibres naturelles végétales grâce à leurs performances et recyclabilités sont les plus adaptés que les fibres naturelles animales (prix élevé et moins disponibles), et plus utilisés dans l'industrie des composites comparés à celles des fibres inorganiques ou minérales voir même comparé aux fibres de verres (Carma, 2006).

Les fibres sont classées selon leur origine (naturelle ou artificielle), leur forme (droite, ondulée, aciculaire, etc.), leur taille (macro ou microfibres) et leurs propriétés mécaniques. Les quatre catégories de fibres utilisées comme renfort dans la composition des composites sont comme suit :

I.1.8. Le renfort par les fibres naturelles

Comptés par des millions de tonnes de fibres végétales comme le chanvre, le lin, l'alfa, les tiges de jute, le sisal et le coton sont utilisées pour fabriquer les tissus, cordes et ficelles.

En conséquence de la hausse du prix du pétrole, et encore l'exigence de conserver l'environnement et aussi pour la disponibilité de la matière végétale et sa biodégradation intéressent les industriels à utiliser la fibre naturelle notamment végétale dans le textile, la construction et particulièrement pour la construction automobile. Elles concurrencent les fibres artificielles et synthétiques dans ces domaines et pourraient trouver de nouveaux débouchés dans l'industrie, notamment en raison de leurs bonnes performances mécaniques, de leur biodégradabilité et de leur faible coût. Les fibres végétales (les fibres à base de coton, de lin, de chanvre, de dattes, de dis, de paille, de sisal. de jute, de kénaf, de coco ou et l'alfa) dans l'industrie et dans le secteur du bâtiment ont remplacé les fibres synthétiques. (Aziz et al. 1981), (Badr *et al.* 2006).

Les polymères et les fibres végétales sont intégrés dans le domaine des bioplastiques et rentrent dans l'industrie de l'automobile en Europe par 100000 tonnes estimée en 2010 (Le chanvre, le lin, le sisal et même l'abaca) (Bahloul *et al.* 2009).

Dans le secteur de la construction, le chanvre est incorporé au béton pour la fabrication de panneaux isolants et la construction de murs. Les fibres de polypropylène permettent un meilleur contrôle du retrait plastique du béton, ce qui se traduit par une meilleure maniabilité et cohésion. L'isolation par les matériaux naturels présente de nombreux avantages environnementaux, tel que la performance d'isolation thermique, capacité à réguler l'humidité

et capture du carbone de l'air, faible consommation d'énergie pour la fabrication, la recyclabilité des fibres végétales. (Arupfire, 2005), (Arnold *et al.* 2012).

Malgré l'avantage de la résistance à la fissuration par "retrait initial" du béton renforcé par les fibres de polypropylène et sa résistance aux chocs, les applications des fibres végétales sont très diverses et sont des matériaux dont les performances techniques et mécaniques peuvent surpasser les matériaux conventionnels.

Les fibres de chanvre de coton, de lin, de Diss, de paille, de sisal, de jute, de kenaf, de coco de palmier dattier sont les fibres naturelles végétales les plus utilisées dans l'industrie et particulièrement, dans la construction sont.

I.1.9. Fibres végétales

Les fibres végétales proviennent des tiges comme le lin ou le chanvre, des feuilles comme les fibres des palmiers dattiers ou les fruits eux-mêmes comme les noix de coco. Ils se caractérisent par une faible densité, une capacité isolante, une résistance élevée à la déchirure et une bonne biodégradabilité, ce qui représente de grands avantages pour l'écologie (Arupfire, 2005).

Les principaux composants sous forme d'une expansion cellulaire filiforme de la fibre végétale sont la cellulose, l'hémicellulose, la lignine et la pectine dont leur rapport détermine toutes les propriétés des fibres.

La fibre végétale est généralement isolée dite unitaire composée d'une cellule élémentaire fibreuse ou sous forme d'un faisceau groupée avec d'autres fibres unitaires et le tout se maintient entre eux essentiellement par l'hémicellulose et la pectine (Hepworth et al. 2000).

La technique de renforcement des matériaux composites par des fibres est de plus en plus utilisée et fortement recommandée, tandis que l'utilisation des fibres naturelles, notamment végétales, comme renfort dans les composites présente plusieurs avantages, s'agissant de matières premières renouvelables et biodégradables, elles offrent une empreinte carbone neutre et une faible production d'énergie (Bourgeois, 2011). Par exemple, la laine a d'excellentes propriétés thermiques mais de mauvaises propriétés mécaniques (Baley, 2003).

Élancement de la longueur des fibres végétales par rapport à leur diamètre, est généralement compris entre 50 et 100 fois (Olesen et al. 1999).

Les conditions de croissance des plantes ont un impact significatif sur les propriétés mécaniques des fibres végétales et leur variabilité de plus, pour maximiser le potentiel de la

fibres, il est important d'adapter le processus d'extraction à l'emplacement et à l'utilisation prévue de la fibre dans l'usine (Silva, 2008).

Par conséquent, ces fibres attirent de plus en plus l'attention en raison de leur faible coût, de leur faible densité, de leur biodégradabilité, de leur disponibilité et de leur facilité d'utilisation et à moindre coût.

Par conséquent, le développement de composites à base de fibres végétales a suscité un intérêt croissant au cours de ces dernières décennies. Sellami (2015) a affirmé que les composites renforcés par des fibres de Diss peuvent être utilisés comme matériaux de remplissage pour les structures soumises aux actions sismiques. En effet, ces fibres présentent une ductilité très élevée, dépassant 15 % en flexion et 30 % en compression. De plus, l'utilisation de briques à base de fibres de Diss constitue un avantage pour les murs en maçonnerie, en raison de leur comportement ductile observé lors des essais mécaniques.

I.1.10. Problèmes liés à l'utilisation des fibres végétales comme renfort

Le renfort en fibres végétales dans les composites cimentaires affectent négativement leurs propriétés mécaniques. A cause des liaisons incompatibles entre le renfort en fibres végétales et la matrice, ce qui entraîne une mauvaise adhérence interfaciale. Aussi le problème est la mauvaise séparation et dispersion des fibres dans la matrice, résultant en des matériaux non uniformes. Il aussi important de noter que la faible stabilité thermique des fibres végétales présente également une limitation. Enfin, la dégradation mécanique (cisaillement et fibrillation) des fibres végétales lors de la fabrication des composites réduit leurs dimensions (diamètre, longueur) et leur rapport d'aspect (L/D), entraînant une diminution des caractéristiques mécaniques (Jean Luc Toupe, 2015).

I.1.11. Avantages et inconvénients des renforts par les fibres végétales

En raison des performances mécaniques et du coût d'exploitations réduit et économique des fibres naturelles, l'industrialisation des composites renforcés par cette matière a augmenté et a remplacé les autres types de fibres tel que les fibres inorganiques ou minérales.

Malgré les propriétés mécaniques (résistance et rigidité), la biodégradabilité et l'origine renouvelable, les fibres animales ne sont pas largement utilisées comme renforts dans les composites en raison de leur prix élevé et de leur faible production.

En revanche, la ressource agricole bio-composite renouvelable, biodégradable des fibres végétales constituent une alternative intéressante dans de multiples domaines d'application

(civils et militaires) par rapport aux fibres synthétiques en raison leurs faible coût, propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité).

Malgré ces matériaux respectueux de l'environnement et tous les avantages que possèdent ces fibres végétales, elles présentent également l'inconvénient que leur utilisation est limitée à moins que les fibres brutes ne soient améliorées (Achour *et al.* 2017), aussi le procédé de mise en œuvre sur la chaîne d'industrialisation des composites fibrés est difficilement reproductible (non industrielle, des propriétés physiques non reproductibles, la quantité et la qualité des fibres).

Le tableau ci-dessous résume les principaux avantages et inconvénients de l'utilisation des fibres végétales.

Tableau 4: Avantages et inconvénients des fibres végétales utiliser comme renfort (Carma, 2006)

Avantages	Inconvénients
Faible coût	Absorption d'eau
Biodégradabilité	Faible stabilité dimensionnelle
Neutre pour l'émission de CO2	Mauvaise tenue en vieillissement
Pas de résidus après incinération	Faible tenue thermique (200 à 230 °C max)
Ressource renouvelable	Fibres anisotropes
Demande peu d'énergie pour être produite	Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, de la météo...
Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité)	Pour des applications industrielles, demande-la gestion d'un stock
Bonne isolation thermique et acoustique	Renfort discontinu

I.1.12. Concept sur les matériaux composites

Cette étude est orientée vers les matériaux composites de construction à matrice minérale renforcée par des fibres végétales, à cet effet ce second chapitre présente les concepts généraux des matériaux composites, les différents types, leurs propriétés, ainsi que les procédés de fabrication et de formulations. Il est présenté aussi dans cette section les différents types de matrices (à base de ciment, de plâtre ou encore de chaux) qui rentrent dans l'élaboration des composites.

I.1.13. Les composites

Un composite résultant de la combinaison d'au moins deux composés et plus non miscibles et de structures différentes. (Alphand, 1989) c'est aussi l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux dans le but d'obtenir un nouveau matériau aux propriétés supérieures à celles de chacun des composants (Daniel, 2005). Le composite est généralement constitué d'un renfort noyé dans une matrice avec possibilité d'introduire des charges et des additifs, pour conférer au matériau composite un ensemble original de propriétés. La figure 2 présente la structure d'un matériau composite.

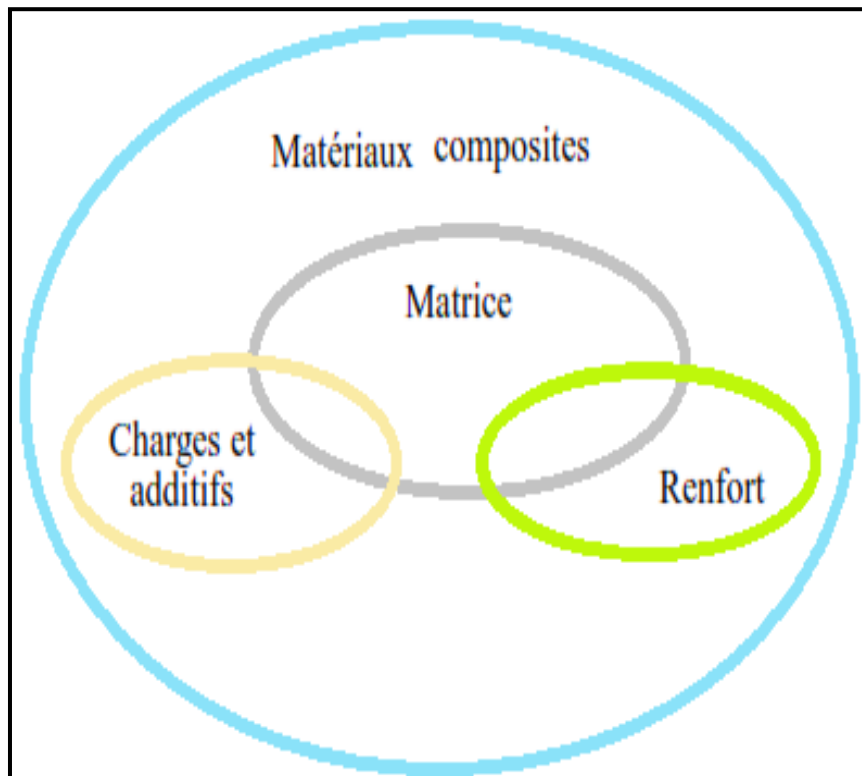


Figure 2: Structure d'un matériau composite

Les composites sont classés suivant le renfort incorporé, la figure 3 présente une classification schématique des différents types de matériaux composites (Ben Mlik, 2016).

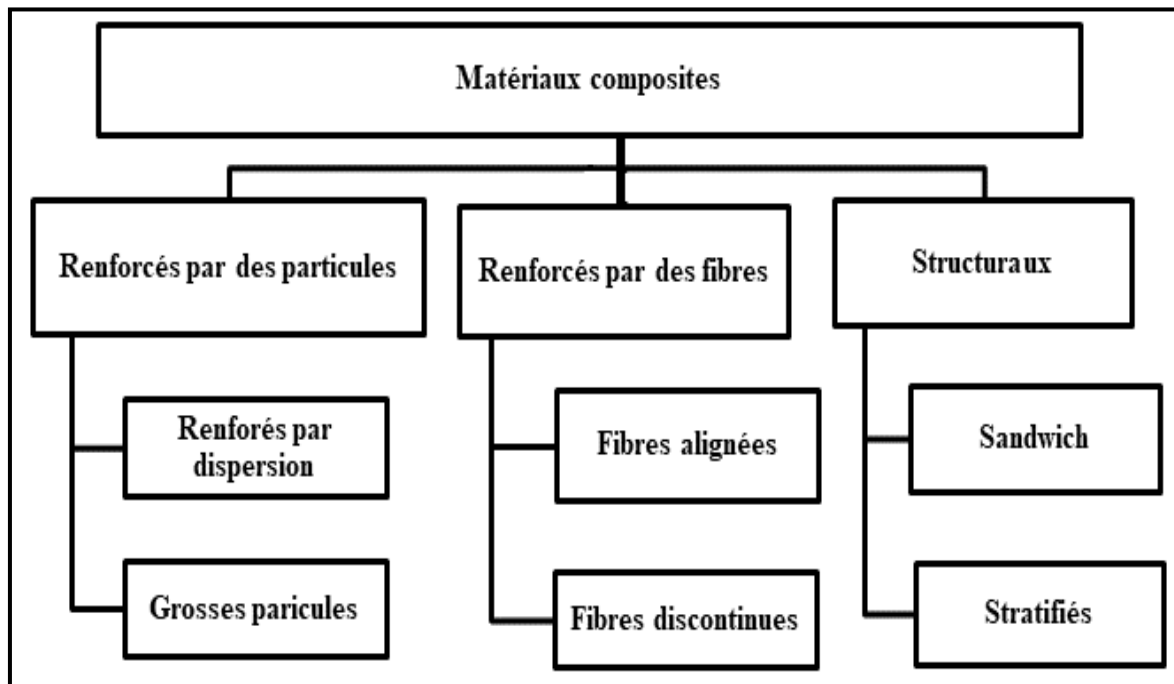


Figure 3: Classification des différents types de matériaux composites (Callister, 2001)

I.1.14. Composites à matrice cimentaire

Les fibres ou particules végétales intégrées dans des liants à base de ciment, parfois associées à des additions fines, sont appelées composites à matrice cimentaire. Plusieurs exemples de ces matériaux sont présentés ci-dessous.

Dans le but de développer de nouvelles voies de valorisation, la possibilité d'élaborer un béton contenant des pulpes de betterave comme charges a été étudiée (Monreal et al., 2011 ; Mboumba-Mamboundou et al., 2013). Ces travaux ont montré une instabilité dimensionnelle due au caractère hydrophile des pulpes, ainsi qu'un retard de prise du liant. Toutefois, un traitement par enrobage des pulpes avec du ciment ou de l'huile de lin a permis de remédier à ces problèmes et d'obtenir un béton présentant de bonnes performances mécaniques, thermiques et hydriques.

L'extraction des fibres de lin destinées aux industries textile et automobile génère une quantité importante de coproduits peu valorisés, notamment les anas de lin, qui peuvent être utilisés comme granulats dans des bétons légers. Néanmoins, leur forte hydrophilie nécessite un traitement de surface préalable afin de limiter leur absorption d'eau. Différents traitements, tels que l'enrobage avec un mélange saccharose-ciment ou huile de lin, des traitements chimiques à base d'élastomères, ou encore un traitement utilisant un mélange pectine/polyéthylénimine, ont été étudiés (Aamr-Day et al., 2008 ; Khazma et al., 2014). Ces procédés ont permis d'améliorer les propriétés mécaniques et la stabilité dimensionnelle du

béton à base d'anas de lin, malgré une légère augmentation de sa densité et de sa conductivité thermique. Le matériau obtenu peut ainsi être classé parmi les bétons isolants.

La saccharification enzymatique de la cellulose du miscanthus, utilisée pour la production de bioéthanol, génère également des coproduits. L'incorporation de ces derniers dans une matrice cimentaire a conduit à l'obtention d'un béton léger, mais présentant de faibles propriétés mécaniques en raison d'un retard de prise. L'ajout d'un accélérateur de prise a permis de réduire ce retard, d'améliorer l'adhérence entre le ciment et les granulats, et d'obtenir un béton aux performances mécaniques satisfaisantes (Acikel, 2011 ; Le Ngoc et al., 2011).

Les fibres de la plante méditerranéenne Diss (*Ampelodesmos mauritanicus*) ont également été valorisées par leur intégration dans des composites cimentaires. Les fibres brutes, sans traitement préalable, contiennent des substances inhibitrices telles que les sucres et les pectines, qui retardent l'hydratation du ciment et diminuent la cohésion du matériau. Parmi les traitements étudiés pour atténuer cet effet, le traitement thermique par immersion dans l'eau bouillante s'est révélé efficace, permettant une amélioration significative des propriétés mécaniques du béton à base de fibres de Diss (Fertikh et al., 2011).

Enfin, plusieurs essences de bois telles que le sapin, le hêtre, le pin maritime, l'épicéa et le bambou ont été utilisées sous forme de granulats pour la fabrication de bétons composites, en raison de leur stabilité dimensionnelle et de leur compatibilité avec le ciment. Dans la plupart des cas, un traitement de surface est nécessaire, tandis que certains auteurs ont préféré modifier la matrice cimentaire par l'ajout d'additions fines, notamment des argiles ou des agrégats siliceux. Ces approches ont permis d'améliorer les performances globales des composites élaborés (Mougel, 1992 ; Beraldo, 1994 ; Ledhem, 1997 ; Al Rim, 1999 ; Benmalek et al., 2000 ; Govin, 2004 ; Coatanlem et al., 2006 ; Bederina et al., 2012).

I.1.15. Composites à base de chaux

Les composites à fibres végétales incorporées dans une matrice à base de chaux aérienne et de chaux hydraulique dans des proportions variables peuvent être utilisées.

Le chanvre est une plante annuelle composée de tige fibreuse et des graines.

Les études menées par (Arnaud *et al.* 2012), (Walker *et al.* 2014) ont montré que les propriétés mécaniques des bétons de chanvre à base de chaux sont faibles par rapport à des bétons à matrice cimentaire s'ils sont utilisés sans aucun traitement de surface.

Le compactage pendant l'élaboration de ces composites s'avère bénéfique pour augmenter ces performances mécaniques. A partir des recherches menées et des résultats obtenus sur les bétons renforcés par les fibres de chanvre, des lois et règles ont été mises en application pour réglementer les constructions en chanvre (Association construire en chanvre, 2008).

. Le tournesol est une plante largement cultivée pour ses graines riches en huile alimentaire. La matrice utilisée dans ces études, (Nozahic *et al.* 2012), est un mélange de chaux hydraulique et de méta kaolin (Béton de moelle de tournesol) et parfois un adjuvant d'origine végétale est employé semblent prometteurs.

I.1.16. Composites avec d'autres matrices

Bien que de grandes quantités de gypse jouent le rôle de retardateur pour le ciment Portland mais certains bétons végétaux sont élaborés avec du gypse pour améliorer la résistance à la fissuration, (Boustingorry, 2002) a montré que cette association ne posera pas de problème de prise.

Les fibres de peuplier améliorent la contrainte de rupture et le caractère hydrophile de matériau dépend linéairement de la quantité de bois utilisée, tandis que le traitement thermique par une pyrolyse contrôlée sous atmosphère inerte permet une stabilisation dimensionnelle du matériau.

(El Hajj *et al.* 2011), ont intégré les étoupes brutes de lin pour élaborer un composite auto lié, pour ce faire, ils ont extrait et recombina des substances internes à la fibre.

I.1.17. Composites à base de fibres végétales

Il existe plusieurs types de composites destinés pour des utilisations diversifiées et qui ont des propriétés différents à cause de la diversité des fibres utilisées. L'élaboration de composites fibrés pour chaque étude est basée sur une formulation, un processus et des techniques de fabrication distincts. Cette section explore les principaux aspects de la différence des propriétés finales des composites fibrés.

I.1.18. Propriétés du renfort en fibres végétales

La fibre végétale doit respecter plusieurs critères pour être compatible avec la matrice et produire un composite végétal fibré de qualité qui répond aux recommandations voulues. Voici les principaux points à considérer :

- **Compatibilité avec la matrice** : le renfort en fibres végétales ne doit pas contenir des substances qui puissent perturber l'hydratation et retarder la prise de la matrice. Cela signifie que les fibres doivent être chimiquement inertes vis-à-vis de la matrice et ne contenir pas de substances qui pourraient interférer avec la réaction d'hydratation.
- (Mougel, 1992), a associé une matrice cimentaire avec différentes essences de bois, il a trouvé que le ciment est plus compatible avec le sapin et l'épicéa en comparaison avec

le chêne, le hêtre ou le pin. (Cérézo, 2005), et a rapporté que le ciment et le chanvre ne sont pas compatibles.

- **Teneur en extractibles et comportement en milieu alcalin** : d'une part certaines particules végétales contiennent des extractibles (sucres libres, tanins) et d'autre part le comportement des fibres végétales en milieu alcalin peuvent inhiber l'hydratation du liant, (Par exemple, la solubilisation de certains extractibles peut modifier la réaction d'hydratation) (Jorge *et al.* 2004), (Govin, 2004), (Cheumani *et al.* 2011), cela peut ralentir la prise du composite végétale fibré et affecter ses propriétés mécaniques...

- **Adhérence avec la matrice** : La fibre végétale doit avoir une bonne adhérence avec la matrice pour assurer une bonne intégration et des propriétés mécaniques optimales. Une faible adhérence des fibres de Diss à la pâte de ciment a entraîné une chute de résistances du composite (Merzoud *et al.* 2008). (Nguyen, 2010), a rapporté aussi que la faible adhérence du composite à base de fibres de chanvre a induit une chute des propriétés mécaniques.

L'amélioration de l'adhérence entre le renfort et la matrice nécessite un traitement de surface sur les fibres (Bederina *et al.* 2009), (Tamba *et al.* 2007), (Nozahic, 2012).

- **Résistance mécanique** : La fibre végétale doit avoir une résistance mécanique suffisante pour supporter les sollicitations mécaniques et résister à l'endommagement de la matrice, car les fibres végétales reprennent presque l'ensemble des sollicitations après l'endommagement de la matrice, et le comportement du composite est, à partir de ce stade, celui des fibres compactées.

- **Comportement hygrothermique** : La conductivité thermique et le comportement vis-à-vis de l'eau de la fibre végétale sont importants pour déterminer la qualité hygrothermique du composite végétal. Cela influence la diffusion de la chaleur et de l'humidité dans le composite. L'utilisation d'un composite renforcé par des fibres végétales permet d'améliorer la performance hygrothermique des éléments (Tran Le *et al.* 2010), et le faible coefficient d'absorption de la moelle de tournesol permet de formuler un composite avec moins d'eau et donc une pâte moins poreuse (Magniont, 2010) (bonne résistance mécanique).

En résumé, pour produire un composite fibré végétal de qualité, il est essentiel de choisir des fibres végétales compatibles avec la matrice, avec une bonne adhérence et une résistance mécanique suffisante, et qui présentent un comportement hygrothermique approprié.

I.1.19. Propriétés et compatibilité de la matrice

La compatibilité entre les fibres végétales et la matrice est une question cruciale à prendre en compte et rend le choix de la matrice important et complexe. Généralement les fibres végétales, ont une structure poreuse qui les rend très sensibles à l'eau. Lors de l'hydratation du

ciment, les fibres végétales peuvent interférer avec la réaction d'hydratation, ce qui peut ralentir ou empêcher la prise du béton.

Pour assurer au composite végétal les performances nécessaires, plusieurs auteurs préconisent que le choix de la matrice et les traitements appliqués aux fibres végétales sont des facteurs clés. D'une part assurer une mise en œuvre correcte du composite à l'état frais et d'autre part améliorer la compatibilité entre les fibres végétales et la matrice.

I.1.20. Procédés de fabrication des composites

Les techniques pour élaborer des structures composites sont nombreuses. Ces technologies dépendent principalement des matériaux (matrice et renfort) utilisés. Les composites peuvent être formés par des processus manuels ou mécaniques de moulage ouvert ou de pression (Ragoubi, 2010). La technique de transformation des plastiques (plasturgie) est la plus utilisée sous forme de mélange ramollie chaud fabriqué par des procédés distincts tel que le moulage : au contact ; par compression de matériaux preimprégnés (SMC) ; par injection de compound (BMC) et par injection basse pression de résine (RTM)

La fabrication de ce type de composites nécessite l'utilisation d'un dispositif de mélange thermocinétique pour avoir un mélange homogène à haute température et fabriqué avec le produit par thermoformage (moulage sous compression/injection/extrusion).

I.1.21. Propriétés mécaniques des composites végétaux

Les études du comportement mécanique des composites végétaux sont généralement basées sur leur résistance à la compression et à la traction, leurs propriétés élastiques et leur ductilité.

Pas mal d'études ont admis que le taux du dosage élevé de la matrice influe positivement sur les caractéristiques mécaniques du composite à base de fibres végétales (Bouguerra, 1997), (Monreal, 2007), (Mougel, 1992). Tandis que d'autres auteurs (Cérézo, 2005) et (Nguyen, 2010]) ont avancé que le compactage appliqué sur les composants du composite fibré pendant l'élaboration sert à diminuer la porosité intergranulaire, et améliorer par conséquence ses propriétés mécaniques. Le tableau 5 qui suit regroupe des propriétés résultantes de certaines études appliquées sur des différents composites à matrices minérales renforcées par des fibres végétales.

Tableau 5: Propriétés mécaniques de certains composites végétaux (Akkaoui,2014)

Matériaux	Densité (kg/.m³)	Résistance en compression (MPa)	Résistance en flexion (MPa)	E (MPa)	Référence
Béton de betterave	800	1,4-2,1	0,1-0,2	-	(Monreal, 2007) ; Ledhem, 1997)
Ciment-argile-bois	850-1120	8,5-12,7	1,5-5	-	(Ledhem, 1997)
Ciment-argile-bois	620-1280	3-9,5	0,1-0,2	-	(Bouguerra, 1997)
Ciment-argile-sapin	1000-1200	4-8	-	-	(Mougel, 1992)
Béton de chanvre	250-660	0,25-1,15	-	4-160	(Cérézo, 2005)
Béton de bois	890-1400	8-32	-	2000-8500	(Cheumani, 2009)
Anas de lin agrolé	263-570	3,6-5,8	0,12-3,9	-	(El Hajj <i>et al.</i> 2009)

D'après les résultats des études tirés du tableau 5, nous avons remarqué que la majorité des essais ont été basés sur la résistance à la compression, tandis que peu de recherches ont traité la résistance à la flexion et la ductilité.

I.1.22. Techniques de mise en œuvre

Les procédés de fabrication des composites plastiques renforcés par des fibres végétales sont, dans leur ensemble, comparables à ceux employés pour les composites renforcés par des fibres conventionnelles telles que les fibres de verre ou de carbone. Dans le cas des composites à matrice thermoplastique renforcés par des fibres naturelles, les techniques de mise en œuvre les plus répandues sont l'extrusion, le moulage par injection et le moulage par compression. En revanche, pour les composites à matrice thermodurcissable, des procédés comme le moulage par transfert de résine (RTM) et le procédé SMC (Sheet Molding Compound) sont largement adoptés (Baley, 2005). De plus, le moulage par compression des thermodurcissables ainsi que la pultrusion sont particulièrement adaptés à la production de composites renforcés par des fibres naturelles (Faruk et al, 2014).

Par ailleurs, les équipements intégrant le moulage par compression et l'extrusion, ou combinant extrusion et injection, permettent une fabrication en une seule étape (procédés directs) et offrent des avantages économiques notables, notamment une réduction de la consommation énergétique pouvant atteindre environ 40 % par rapport aux procédés en deux étapes (Bürkle et al, 2009). Toutefois, ces technologies présentent certaines limitations. Bien

qu'elles contribuent à limiter les contraintes thermiques et mécaniques appliquées aux fibres cellulosiques et aux autres constituants au cours de l'élaboration des composites (Bledzki et al, 2007), elles conduisent généralement à des propriétés mécaniques inférieures à celles obtenues à partir d'équipements non combinés reposant sur des procédés en deux étapes (Ruch et al, 2002).

I.1.23. Formulation des composites renforcés par des fibres végétales

L'élaboration d'un composite fibré requiert l'établissement d'une formulation appropriée permettant d'obtenir des propriétés finales spécifiques, ce qui implique la détermination des proportions optimales de chaque constituant. Cette étape s'avère particulièrement complexe, en raison d'une maîtrise encore partielle des propriétés des fibres végétales, mais également de l'absence quasi totale de recommandations normalisées pour la caractérisation des constituants des composites fibrés. Cette situation résulte notamment du manque de normes définissant clairement les paramètres à considérer lors de la formulation.

Par ailleurs, la grande diversité des fibres végétales utilisées dans les composites fibrés, issues de différentes espèces végétales, complique l'établissement de règles de formulation communes à l'ensemble des composites à renforts végétaux. Toutefois, de nombreuses études ont été menées afin d'identifier et de mieux comprendre les paramètres influençant les propriétés finales de ces composites.

I.1.24. Fabrication et mise en œuvre des bétons végétaux

Contrairement au béton traditionnel, l'élaboration de chaque type de composites végétaux fibrés, nécessite une méthode spécifique à cause de la diversité des fibres rajoutées et de leurs comportements différents (taux d'absorption d'eau, géométrie... etc.).

I.1.25. Malaxage des constituants des composites végétaux fibrés

Pour élaborer un bio-composite fibré, l'état du renfort à ajouter influence sur la méthode de sa fabrication. Alors pour le gâchage des composantes qui rentrent dans la formulation du composite de fibre végétale, deux choix sont à prévoir dans le but d'assurer une qualité meilleure : le premier est de malaxer à sec les fibres végétales avec le liant puis introduire l'eau, ou malaxer le liant avec l'eau puis introduire les fibres végétale. Le second choix permet, soit d'introduire les fibres mouillées ou sèches.

(Mougel, 1992), pour les composites en bois et (Bruijn *et al.* 2009) pour les composites de chanvre ont conclu que mélanger le ciment avec de l'eau puis introduire les fibres dont l'humidité est stabilisée dans les conditions ambiantes est la méthode la plus efficace. Tandis

que (Bouguerra, 1997), (, 1997), ont mélangé le liant (ciment et additions), et les granulats de fibres végétales saturées puis malaxer le mélange avec l'eau.

(Cérézo, 2005) et (Nguyen, 2010), ont préconisé de pré-mouiller les fibres de chanvre, ensuite d'ajouter le liant et malaxer avant de verser l'eau de gâchage, la même méthode de malaxage a été appliquée par (Monreal *et al.* 2011), sur les constituants de béton de pulpes de betterave.

I.1.26. Conditions de cure des bétons végétaux

Vu les spécifications distinctes de chaque composite fibré élaboré, aucune instruction ou norme n'a été recommandée pour conserver les éprouvettes fabriquées.

Plusieurs études ont montré que les éprouvettes ont été conservées dans un milieu à un taux d'humidité qui varie entre 90 et 95 % et température de 20°C pendant toute la période de cure (généralement 28 jours), (Benmalek *et al.* 2000), (Monreal *et al.* 2011). (Ledhem *et al.* 2000), (Bederina *et al.* 2012) les ont conservées en conditions humides pendant 24 heures ou 7 jours (Savastano *et al.* 2005), (Coatanlem *et al.* 2006), puis en conditions ambiantes (humidité relative entre 50 et 55 % et température de 20-23°C).

I.1.27. Impact du milieu cimentaire sur les fibres végétales

La matrice cimentaire est un milieu alcalin qui provoque la dégradation des fibres végétales par la dissolution partielle ou totale de la cellulose, des hémicelluloses et de la lignine qui les composent (Gram, 1983), ce qui rend par conséquent le composite non ductile. Ce fait indésirable a incité beaucoup de chercheurs à étudier le comportement des fibres immergées dans des solutions alcalines différentes. Quelques études en été regroupées dans Le tableau 6 qui suit :

Tableau 6: des études de comportement de fibres immergées dans des différentes solutions alcalines

Auteur et année	Fibre	Milieu d'immersion	Duré d'étude	Diminution de résistance	Diminution de ductilité
(Juarez <i>et al.</i> 2007).	agave	Ca(OH) ₂ à pH 12,5	12 mois	70 %	83 à 73 %
Toledo <i>et al.</i> 2000*	Sisal	hydroxyde de	210 jours	66 %	
	coco	calcium		41 %	
	sisal	soude	420 jours	27 %	
	coco	(NaOH)		39 %	

Toledo *et al.* 2000 a immergé les fibres de sisal et de coco dans de l'eau à pH 8,3, du Ca(OH)₂ à pH 12 et du NaOH à pH 11. Avant d'immerger ces fibres dans la solution d'hydroxyde de calcium, pour 210 jours et dans la solution de soude (NaOH) pendant 420 jours, la dégradation des fibres végétales en milieu alcalin est le principal facteur expliquant la perte des propriétés mécaniques dans le temps et la diminution de la ductilité des composites cimentaires qui les incorporent. Ce phénomène est lié à la dissolution partielle ou totale des constituants des fibres, en particulier la cellulose, les hémicelluloses et la lignine.

I.1.28. Choix des fibres végétales pour optimisation des performances des composites

Les propriétés mécaniques intéressantes des fibres naturelles d'origine végétale (fibres lignocellulosiques) ont favorisé leurs utilisations à grande échelle comme renforts dans les composites. De ce fait, améliorer les caractéristiques des composites par la recherche des traitements et combiner des formulations adéquates et optimales est l'enjeu majeur.

Pour réussir à élaborer un composite qui répond aux exigences environnementales, économiques et de haute qualité mécanique et physique, il est impérativement nécessaire de prendre en considération certains paramètres tels que le choix de l'espèce végétale, l'emplacement des cultures et les fibres végétales, le climat, la maturité des plantes, le type d'extraction et les traitements post-extraction, qui sont basés sur des changements physiques

Par exemple, il a été démontré que les plantes cultivées dans des conditions climatiques chaudes (température moyenne de 30°C) ont des fibres de kénaf plus longues et de meilleures propriétés mécaniques que les plantes cultivées dans des climats plus frais (température moyenne de 22°C).

De plus, les fibres extraites de la partie inférieure de la plante (0–500 mm au-dessus du sol) avaient de meilleures propriétés mécaniques que celles extraites de la partie supérieure (1500–2000 mm au-dessus du sol) (Ochi, 2008). De même, les composites fabriqués à partir de fibres avec des longueurs initiales plus longues et/ou des rapports d'élancement (L/D) plus élevés ont donné de propriétés mécaniques supérieures comparés aux composites fabriqués avec des fibres de départ plus courtes, des rapports L/D inférieurs, (Bledzki *et al.* 2008 ; Migneault *et al.* 2009).

Les dispersants et divers additifs sont fréquemment employés dans les composites à base de bois, car ils influencent les propriétés de surface des constituants en modifiant la tension interfaciale. Par ailleurs, les traitements par décharge électrique, tels que le traitement corona (George *et al.*, 2001 ; Gassan *et al.*, 2000 ; Ragoubi *et al.*, 2010 ; Martin *et al.*, 2000 ; Bozaci *et*

al., 2013) ainsi que le plasma froid, figurent parmi les méthodes physiques les plus couramment utilisées pour améliorer l'adhésion et la compatibilité entre les fibres et les matrices.

De nombreuses études ont également été menées afin d'améliorer la durabilité à long terme des composites cimentaires renforcés par des fibres végétales. En effet, le milieu fortement alcalin de la matrice cimentaire engendre une dégradation des fibres végétales, ce qui affecte négativement les propriétés mécaniques et la ductilité des composites.

Pour pallier ce phénomène, les travaux de recherche s'orientent généralement selon deux approches complémentaires. La première consiste à réduire l'agressivité du milieu matriciel vis-à-vis des fibres végétales, notamment par des traitements spécifiques ou par la modification de la composition de la matrice. La seconde vise à renforcer et protéger les fibres afin d'accroître leur résistance aux attaques du milieu alcalin.

Les traitements explorés doivent impérativement être étudiés pour minimiser le coût et le respect de l'environnement en minimisant les conséquences négatives.

I.1.29. Traitement des fibres

L'utilisation des fibres végétales pour l'élaboration des composites cimentaires exige d'appliquer des traitements pour améliorer les caractéristiques des fibres (minimiser le comportement hydrophile des fibres végétales et éliminer les particules inhibitrices), et augmenter par conséquent les performances mécaniques du composites fibrés. Le tableau 7 qui suit présente des différents traitements appliqués sur les fibres végétales.

Tableau 7: Quelques études rapporté sur différents traitements appliqués sur les fibres végétales

Traitements			
Chimiques			
	Auteurs ; fibre ; matrice	Résultats	Conclusion
Hydroxyde de calcium*	(Le Troedec, 2009) ; (Sedan, 2007) ; chanvre ; matrice cimentaire.	Mauvaise adhésion à l'interface fibre/matrice, ce qui générerait une fissuration prématurée du composite à cause de la création d'une zone intermédiaire fibre / matrice, suite au dépôt de calcium sur celles-ci.	Diminution importante de la résistance en flexion du composite cimentaire après 28 jours de cure.

	(Nozahic, 2012) ; chènevotte (anas de chanvre) ; bétons de chanvre.	Partie des polysaccharides éliminés de la surface des particules et des clusters de carbonates déposés. Variation du comportement hygroscopique. Le test d'arrachement a souligné l'aptitude du traitement à la chaux à l'adhésion entre les particules végétales améliorées.	Abaissement des résistances mécaniques du composite (bétons de chanvre).
Hydroxyde de sodium	(Van de Weyenberg <i>et al.</i> 2006).	conduit à un changement de leur structure.	
	(Sedan, 2007) ; chanvre ; matrice cimentaire	dégradation des impuretés, des hémicelluloses et des graisses à la surface de la fibre. ce qui améliore leur adhérence avec la matrice.	Augmentation de 39 % de la résistance en flexion par rapport à un composite incorporant des fibres non traitées.
	(Toledo <i>et al.</i> 2000) ; Sisal Noix de coco	Influence minime sur les fibres par l'hydroxyde de sodium.	Résistance initiale des fibres en traction conservée après 420 jours d'immersion (Sisal 73% et Noix de coco 61%).
	(Chafei <i>et al.</i> 2014) ; lin ; Mortier.	Absorption d'eau diminuée de (11 %) dû à la réduction du taux d'hémicelluloses. transfert facile des efforts entre les microfibrilles, à cause des pectines et lignines éliminée.	Résistance en traction de la fibre de lin été augmentée Résistance en flexion du composite c'est également augmentée de 30 % au bout de 90 jours.
Estérification acétylation *	(Hill <i>et al.</i> 1998).	l'anhydride acétique, réduire le caractère hydrophile de fibres de cellulose.	
	(Khazma <i>et al.</i> 2014) ; anas de lin	l'absorption d'eau par les anas a été fortement réduite de - 67 % par rapport aux anas non-estérifiés.	Résistance en flexion du composite cimentaire été fortement améliorée, par rapport aux anas non estérifiés.
L'eau bouillante	(Chafei <i>et al.</i> 2015) ; lin	Temps de prise est passé de 12 heures pour les fibres non traitées à 8 heures pour les fibres traitées.	Résistance en flexion du composite a été améliorée de 30 %.

Enrobage organique			
Paraffine	(Nozahic <i>et al.</i> 2012) ; granulats de tournesol. (Juarez <i>et al.</i> 2007) ; agave.	Augmentation de 67 % de la contrainte de cisaillement pour l'essai d'arrachement. Diminution de la sensibilité à l'environnement alcalin. diminuer l'absorption d'eau.	Augmentation de la résistance Augmentation de la ductilité
L'huile de lin	(Monreal <i>et al.</i> 2011) ; pulpe de betterave, (Khazma <i>et al.</i> 2014) ; Anas de lin. (Merzoud, 2007 ; Diss. (Nozahic, 2012 ; Nozahic <i>et al.</i> 2012); Chènevotte ; granulat de tournesol. (Juarez <i>et al.</i> 2007) ; agave. (Lazko <i>et al.</i> 2011) ; lin.	Réduire plus de 50 %, l'absorption d'eau.	la résistance à la flexion du composite a été améliorée.
Enrobage minéral			
ciment+ sucrose	(Khazma <i>et al.</i> 2008) ; anas de lin ; matrice cimentaire.	Augmentation de la masse volumique en vrac de 96-103 kg.m ⁻³ pour les granulats bruts à 255-283 kg.m ⁻³ pour ceux revêtus. diminution de 73% de l'absorption d'eau.	Augmentation forte de la résistance en flexion du composite cimentaire. Résistance en flexion du composite à la chaux est bien en deçà de celle du composite non fibré,
fumée de silice	(Toledo <i>et al.</i> 2000) ; fibres longues de sisal ; matrice cimentaire.	enrober les fibres de sisal pour créer une zone de faible alcalinité. dégradation par attaque alcaline réduit.	Ténacité et résistance à la flexion du composite cimentaire amélioré, durabilité accrue puisque qu'après 322 jours, la résistance a été conservée et est même légèrement supérieure à celle du composite aux fibres non traitées.
Enrobage au ciment	(Chafei, 2014) ; lin ; matrice cimentaire	absorption d'eau diminuée d'environ 50 %.	Résistance en flexion du composite à 90 jours a été améliorée d'environ

et à la chaux		Bonne adhérence fibre/matrice.	15 %pour les fibres de lin enrobée de ciment.
Thermiques			
Rétification Pyrolyse*	(Boustingorry, 2002) ; bois de pin (Bilba <i>et al.</i> 2008) ; bagasse.	stabilité dimensionnelle, diminution de la quantité d'hémicellulose. augmentation de la porosité de 6 %, la fibre devient plus hydrophobe. gonflement importants.	en raison de la disparition d'une partie des hémicelluloses

***Estérification acétylation :** Réaction d'estérification avec l'anhydride acétique

***Hydroxyde de calcium :** immergé pendant une certaine durée les particules végétales dans une solution saturée de chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$

***Rétification pyrolyse :** Décomposition chimique sous l'action de la chaleur, dans une atmosphère réduite en oxygène

I.1.30. Modification de la matrice cimentaire

L'alcalinité du milieu de la matrice cimentaire est la cause principale qui sert à dégrader les composants constituant les fibres végétales (minéralisation des fibres provoquée par la présence d'hydroxyde de calcium dans le milieu basique) (Jonathan Page, 2017). Pour remédier par un second choix à cette pathologie (le choix précédent est le traitement des fibres), en conservant la structure et la composition des fibres végétales qui jouent le rôle de renfort dans les composites biofibrés. D'autres auteurs ont préconisé de minimiser l'agressivité du milieu par le remplacement d'une quantité de la matrice cimentaire par des taux de liants pouzzolaniques, tels que le métakaolin, le laitier de hauts fourneaux, ou le ciment sulfo-alumineux.

Ces substitutions ont montré des résultats prometteurs. (Soroushian *et al.* 2013) ont montré que, la substitution de 30 % du ciment par de la fumée de silice permet de mieux contrôler le vieillissement d'échantillons soumis à des cycles d'humidification-séchage puis carbonatation. (Toledo *et al.* 2003), ont démontré que la substitution de 10 % du ciment par de la fumée de silice permet le maintien des propriétés des composites soumis à différents cycles de vieillissement, tels que des cycles d'immersion et de séchage.

Pour empêcher la minéralisation des fibres par l'élimination de l'hydroxyde de calcium (Toledo *et al.* 2009) préconisent que la matrice cimentaire soit composée de 50 % de ciment, 30 % de métakaolin et 20 % de briques d'argile broyées-calcinées.

Ces précédents résultats indiquent que la modification de la matrice cimentaire en ajoutant des liants alternatifs peut être efficace pour maintenir la ductilité et améliorer le comportement mécanique à long terme des composites biofibrés.

I.1.31. Concept sur les fibres et les fibres végétale

En général les fibres sont des éléments sous forme de filaments qui ne dépasse pas 0,5 mm de diamètre, ils sont classés suivant leurs origines en trois principales catégories, fibres animales ; minérales et végétales. D'après notre synthèse bibliographique sur les fibres principalement utilisées comme renfort des composites, nous avons constaté que la majorité s'articule sur quatre types de fibres, synthétiques ; artificielles ; minérales et végétales.

Les fibres naturelles classées suivant leurs origines sont :

I.1.32. Fibres naturelles

Les fibres naturelles sont des fibres provenant de la nature, qui n'ont pas été sujetes à aucune transmutation causée par l'homme, elles sont réparties en trois types :

1. Fibres animales obtenues par l'extraction de poils des animaux.
2. Fibres minérales comme le basalte (roche volcanique éruptive noire et dure, formée de petits cristaux de silicates) et l'amiante (forme fibreuse Constituée de silicate hydratés de magnésium et de calcium) Microsoft encarta 2007.
3. Fibres végétales obtenues par l'extraction des plantes telles que les arbres...etc.

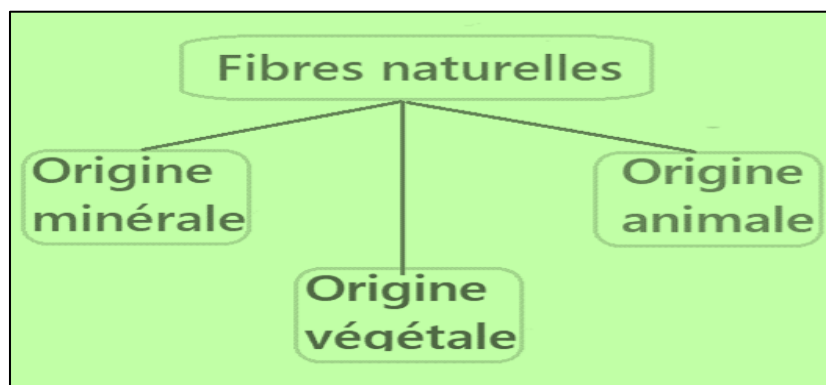


Figure 4: Classification des fibres naturelles

I.1.33. Fibres naturelles d'origine animale

La fibre naturelle extraite des animaux d'une composition principalement protéique protéines (kératine s'il s'agit de laine, fibroïne s'il s'agit de soie) elle se compose en trois catégories.

-Laine : substance provenant de la toison des ovins, vigognes, lamas...etc. Sa structure protéique offre des propriétés inégalées par les fibres synthétiques, notamment une élasticité

-Soie : substance protéique fine sous forme de sécrétée par certains arthropodes tel que la chenille du bombyx du mûrier (ver à soie).

-Poils : sont des filaments constitués de kératine, issus d'épiderme animal en forme de tige filiforme fixée dans le derme (alpaga, cachemire...etc.)

I.1.34. Fibres naturelles d'origine minérale

Sont des filaments d'origine non organique, purement naturels caractérisés par leurs structures et leurs compositions en éléments chimique utiles (Silicatées, verre, amiante, basalte, carbone, métaux) (Jonathan Page, 2017).

Exemple :

- ✓ La fibre de verre obtenue par étirage ou soufflage de verre fondu en filaments ;
- ✓ Les fibres d'amiante, autrefois utilisées pour l'isolation et l'ignifugeage, sa résistance à la chaleur, au feu, aux agressions électriques et chimiques et par son pouvoir absorbant mais se sont révélées cancérogènes (Service du répertoire toxicologique. Amiante .Canada. 2004).
- ✓ Fils métalliques fins utilisés pour fabriquer de la gaze, pour plus de résistance sont prises en sandwich entre des feuilles de film plastique, la laine de roche isolante, est un matériau fibreux formé de laitier d'acier, de calcaire ou de roche siliceuse.

I.1.35. Fibres naturelles d'origine végétale

Provenant des plantes, les fibres végétales sont des structures biologiques fibrilles issues de la biomasse composées principalement de cellulose, un polymère naturel ayant de longues chaînes moléculaires, de glucose, hémicelluloses, lignine et de pectines. Les fibres végétales sont fournies par plusieurs méthodes (extraction ; le broyage.....etc.) que ce soit à partir des tiges (lin, jute, chanvre), des feuilles (sisal), des graines (coton, kapok) ou encore des fruits (noix de coco).

La faible densité, les meilleures propriétés mécaniques et plus particulièrement la biodégradabilité, sont les raisons pour lesquelles sont très utilisées (Sherey *et al.* 2008)

Les fibres végétales elles-mêmes sont divisées en trois catégories :

- a. Les fibres de graines ou de fruits, tel que le coton le kapok et le coco.
- b. Les fibres de feuilles, tel que le sisal. l'abaca, la pajatoquilla, le raphia, le phormium (lin de Nouvelle Zélande) et l'alfa.
- c. Les fibres libériennes ou fibres de tige, extraites de la partie extérieure de la tige telle que le lin, le jute, le chanvre, la ramie, genet, kenaf, jonc, et le bambou.

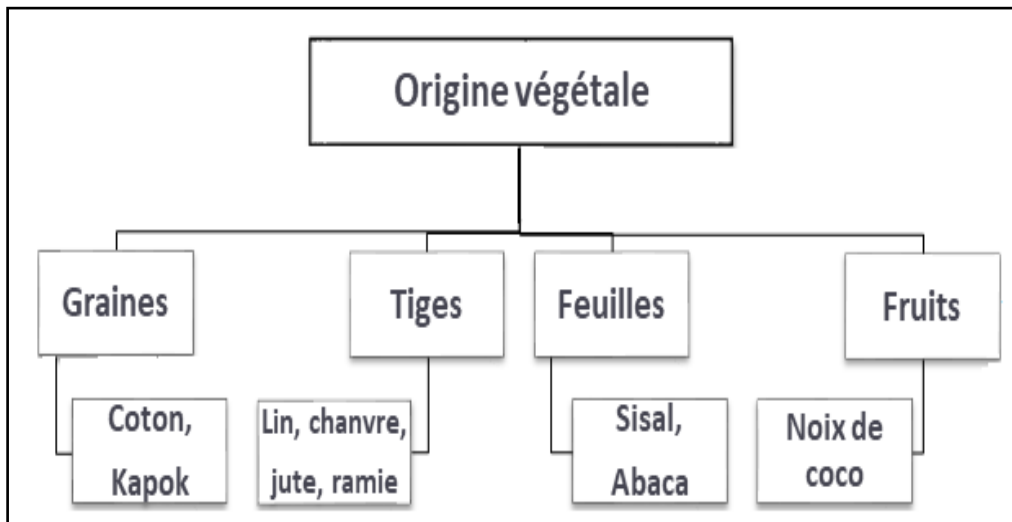


Figure 5: Classification des fibres naturelles d'origine végétale

I.1.36. Composition chimique des fibres végétales (lignocellulosiques)

Les fibres végétales se caractérisent par leur composition chimique, notamment la répartition des quatre composants majeurs de la paroi cellulaire : la cellulose, l'hémicellulose, et deux autres composants qui les lient ensemble sont la lignine et la pectine. La composition dépend de la condition de croissance, de l'âge du végétal, des conditions climatiques et bien sûr de la nature des fibres (Dalour, 2007). La pectine et la lignine représentent les liens des microfibrilles.

La composition chimique des fibres végétales est constituée de plusieurs constituants lignocellulosiques et organiques et d'autres produits tels que les protéines, les pectines, les amidons et les sels inorganiques sont présents en quantités mineures (Alphand, 1989).

La concentration de lignine est de 7 à 24 % en poids et la concentration d'hémicellulose est de 12 à 27 % en poids, ces composés sont des hétéropolymères et leur composition chimique varie considérablement en fonction de leur origine. Les composés inorganiques ont également des teneurs en cendres différentes selon le type de fibre, cette teneur est de 1 % en poids dans les fibres de bois lignocellulosiques et d'environ 14 % dans les fibres de riz. (Reyne, 1990)

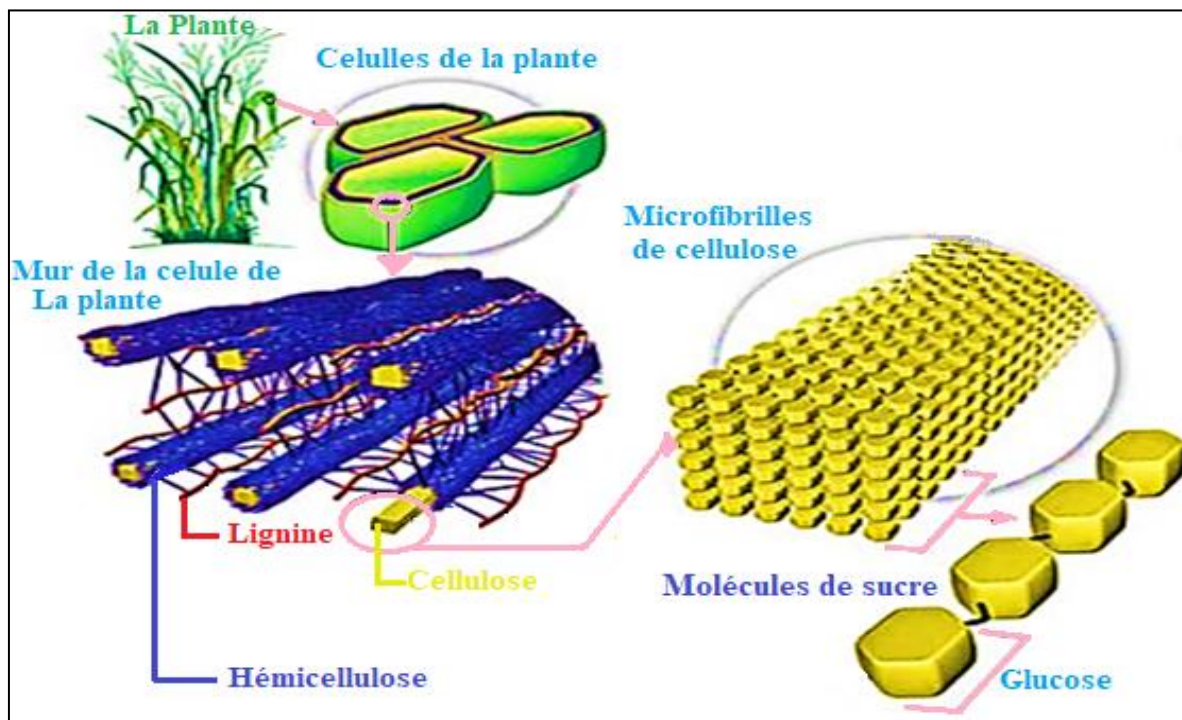


Figure 6: structure et composition d'une paroi végétale (Ritter, 2008)

I.1.37. La cellulose

La cellulose est un polymère qui se trouve dans les parois fibreuses c'est le composant protecteur et de soutien des organismes végétaux. C'est un glucide de formule moléculaire $(C_6H_{10}O_5)_n$, où n représente le degré de polymérisation ; sa valeur peut varier de quelques centaines à quelques dizaines de milliers (Ramezani pour *et al.* 2013). Comme il est présenté sur la Figure 6.

C'est la substance organique la plus abondante dans la nature, avec une production mondiale estimée à environ $1,3 \cdot 10^{10}$ tonnes par an (Neel, 1965 ; Pigman *et al.* 1970).

La cellulose fait partie d'une architecture complexe qui varie selon l'organisme considéré dont cette hiérarchie implique des molécules de cellulose qui est constituée d'un élément de base appelé microfibrille (Kuga *et al.* 1988). Comme il est illustré à la figure 6.

Les chaînes de cellulose individuelles sont liées par des liaisons hydrogène pour former des microfibrilles, qui se lient les unes aux autres pour former des fibres ou des parois cellulaires, ses parois sont enfermées dans une matrice amorphe composée d'hémicellulose, de pectine, de lignine et éventuellement de protéines.

La cellulose a des défauts structuraux et l'hydrolyse des microfibrilles peut conduire à des monocristaux, appelés whiskers. En effet les whiskers gardent le même diamètre des microfibrilles de départ avec une longueur moindre.

Il existe des zones ordonnées dites zones cristallines et des zones non ordonnées (dislocation, torsions et contraintes...) dites zones amorphes le long de la microfibrille (fig.7).

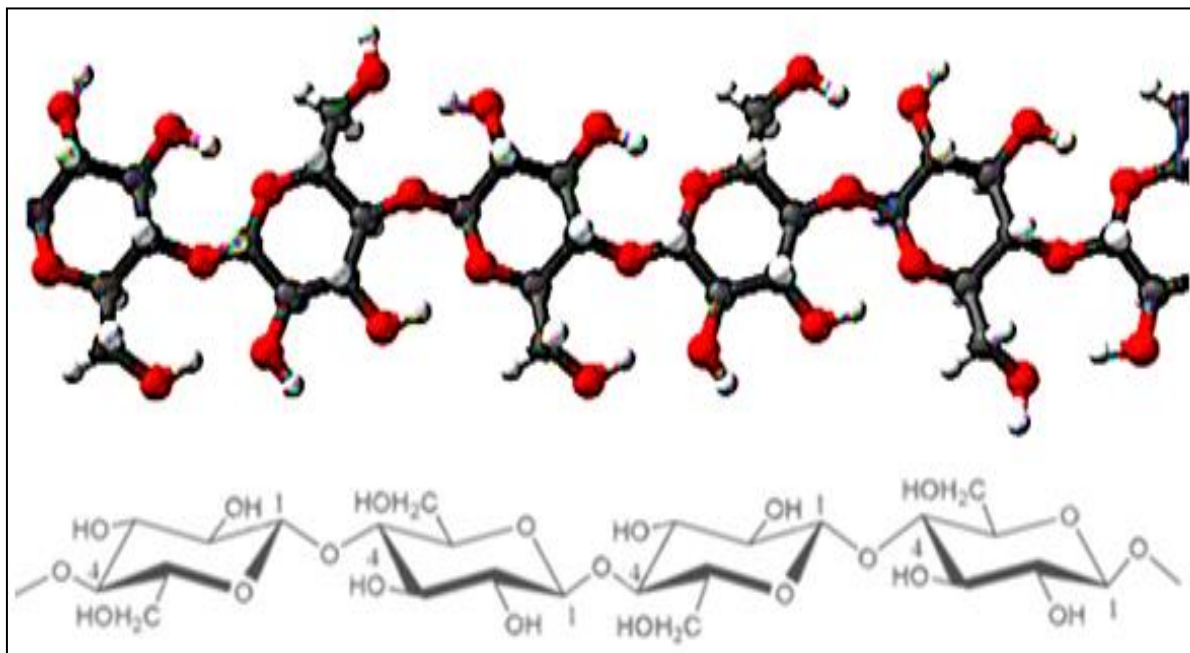


Figure 7: Structure de la cellulose (Sharma *et al.* 2013)

En conséquence de ses microfibrilles très cristallines, la solubilisation de la cellulose nécessite l'utilisation de mélanges de type métal/solvant (hydroxyde d'éthylène diamine (CED), hydroxyde d'ammonium cuivrique ou cadmium d'éthylène diamine (cadoxène), des solvants contenant des sels métalliques tels que le lithium peut également être utilisés (Bikales *et al.* 1971).

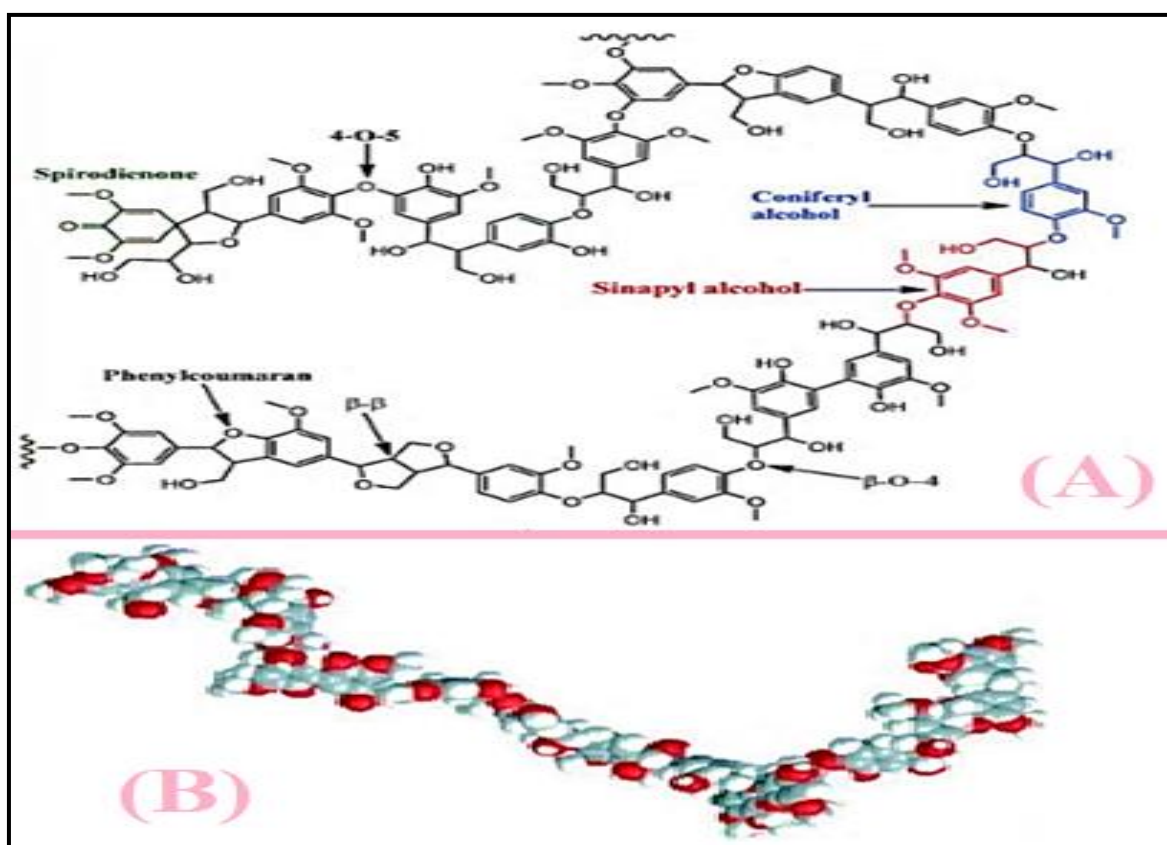
I.1.38. La lignine

La lignine est un polymère aromatique hétérogène présent dans les tissus secondaires des végétaux supérieurs, attachée de manière covalente aux polysaccharides, ce qui améliore l'adhésion interfaciale entre cette matrice et les fibres de cellulose, cette comptabilisation est assurée par l'hémicellulose (Gandini *et al.* 2002).

La lignine renforce la rigidité structurale des parois cellulaires, enveloppe la couche polysaccharidique et confère au mur de la plante une imperméabilité à l'eau avec une bonne résistance à la dégradation biologique et atmosphérique et aux attaques microbiennes. Ces polymères aromatiques protègent la plante des attaques des agents pathogènes (Sarkanen *et al.* 1971). Elle stocke également les phénols toxiques sous forme libre qui sont neutralisés par les plantes, donc c'est la substance qui joue le rôle dans le stockage des déchets végétaux (Hamza *et al.* 2013).

Dans les plantes fibreuses telles que le lin, la majeure partie de la lignine se trouve dans les tissus intermédiaires contenant du xylème et d'autres parois cellulaires utilisées pour conduire l'eau et la sève (Akin *et al.* 1996). Les lignines se caractérisent par la présence de

fonctions OH aliphatiques dont la fréquence varie fortement selon l'origine du polymère. La structure de la lignine peut être représentée par l'exemple général présenté dans la figure 8



(Liu et al. 2015)

I.1.39. L'hémicellulose

L'hémicellulose est un polysaccharide ramifié présent dans tous les végétaux d'un poids d'à peu près 25% de la biomasse. Forme une matrice de support pour les microfibrilles de cellulose et relie tous les composants et assure l'adhérence de la paroi. En effet, ces polysaccharides sont hydrosolubles et peuvent être extraits des cellules végétales par des solutions alcalines.

Les hémicelluloses ont des structures chimiques très différentes et le monomère constitutif est le glucose, mais aussi la xylose, le mannose, le lactose, le rhamnose et l'arabinose (Charlet, 2008).

Les Xylanes : sucres de la paroi primaire majoritaires de la chaîne principale D-Xyl.

Les Mannanes et les Glucomannanes : sucre principal de la chaîne principale D-Man, contenus dans la paroi secondaire.

Les Galactanes : monomère de galactose contenu dans la paroi cellulaire de certaines espèces d'algues rouges.

Les Glucanes : abondants dans la paroi primaire des dicotylédones (20 à 30 % des hémicelluloses) et sucres majoritaires de la chaîne principale D-Glc, ils se divisent en 2 sous-groupes : les Xyloglycanes (XylG) et les β -Glucanes (monocotylédones graminées) (Kato *et al.* 1993 ; Addi, 2008).

L'hémicellulose présente une faible résistance face aux attaques chimiques à cause de son poids moléculaire faible, est responsable de la biodégradation, l'absorption d'humidité et de la dégradation thermique de la fibre (Sedan *et al.* 2008).

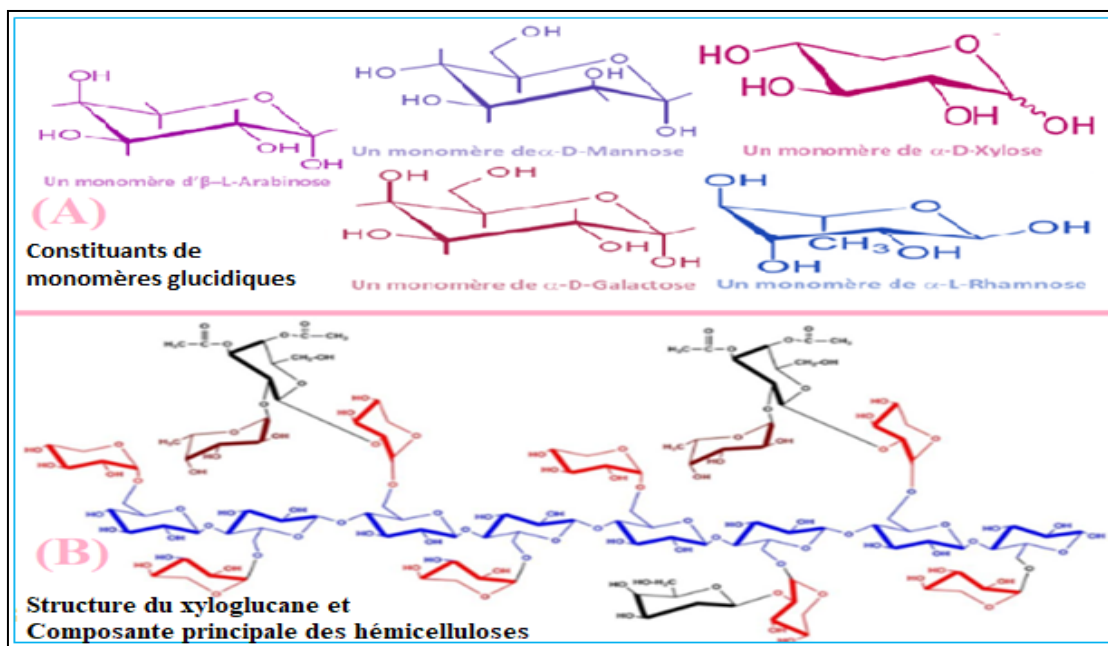


Figure 9: Le bleu : les β -D-glucanes, le rouge : l' α -D-xylose, le noir : l' α -D-galactose et le marron : les résidus de α -L-fucose (Villarreal *et al.* 2012)

I.1.40. Les pectines

La pectine est un polysaccharide à structure complexe constituée d'un squelette et de chaînes latérales (Batra, 2006 ; Hourdet *et al.* 1991). Ils sont principalement composés d'acide galacturonique. La pectine se trouve dans la couche intermédiaire et la paroi primaire des cellules végétales ses macromolécules ressemblent à des zigzags, cette disposition lui confère des propriétés particulières et fournit de la flexibilité aux plantes. Les pectines agissent comme des liens entre différentes cellules c'est la substance responsable de la rigidité et de la liaison. La pectine peut être extraite chimiquement des fibres soit à l'eau bouillante (Rihouey *et al.* 1995), soit avec de l'acide éthylène diamine tétra acétique (EDTA) (Davis *et al.* 1990) de plus, la pectine a également la capacité d'échanger des ions, en particulier des ions calcium. Ainsi, grâce à cet échange d'ions calcium, ils sont capables de se combiner et de former des ponts calciques.

La pectine provoque une augmentation de la viscosité grâce à son pouvoir gélifiant et possède une forte proportion de fonctions carboxyle à pH alcalin qui favorise l'agrégation des molécules de pectine entre elles, ce qui provoque la liaison des chaînes et la formation d'un gel par la pectine. Tout comme une méthylation accrue couplée à une acidité élevée favorise la relaxation de la pectine. Il existe de nombreuses formes différentes de pectine (Belhamri, 2005).

- Protopectine : pectine insoluble dans l'eau
- Acides pectiques : Ce sont des acides polygalacturoniques partiellement ou totalement estérifié.
- Pectinates : Ce sont des sels d'acide pectique

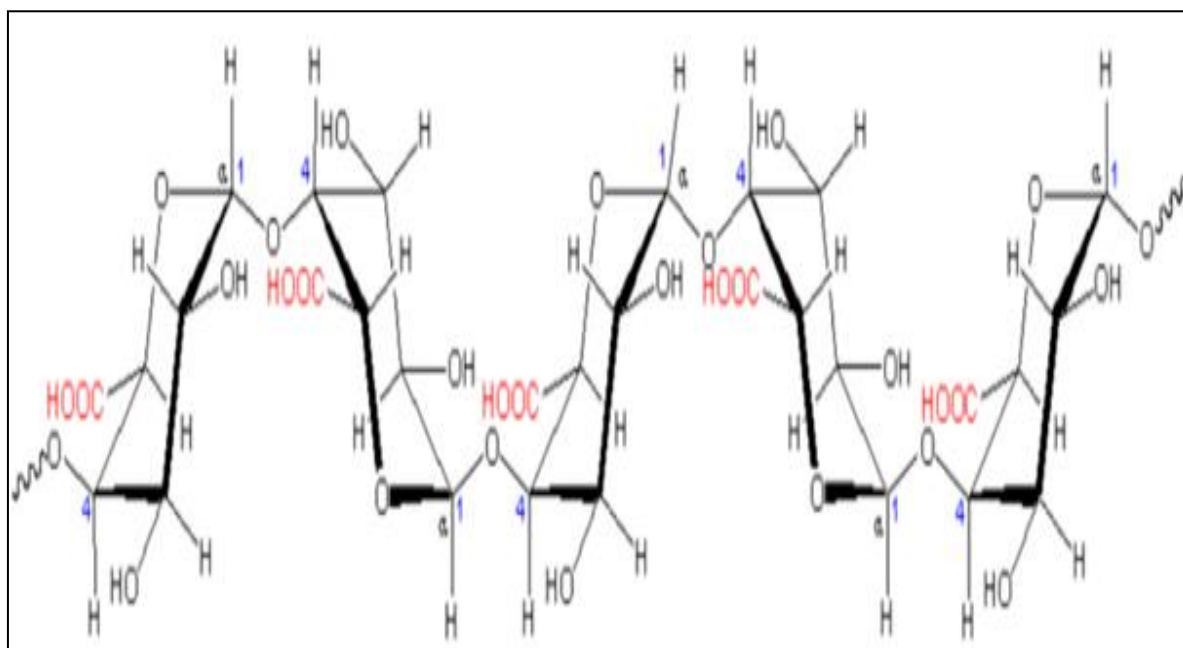


Figure 10: Représentation de la chaîne de la molécule de pectine

I.1.41. Sucres

Le sucre, substance incolore, inodore élaboré dans la plante par procédé de photosynthèse du saccharose chlorophyllienne pour qu'elle puisse vivre et se développer grâce à l'énergie solaire et à partir du dioxyde de carbone puisé dans l'air et de l'eau et sels minéraux absorber par les poils des racines et les transmet par la sève dans les cellules chlorophylliennes situées dans les feuilles selon l'équation suivante :



La formule brute de la plupart de ces substances, fait apparaître hydrogène et oxygène dans les mêmes proportions que dans l'eau (Schmidt. K leur a donné en 1844 le nom d'hydrates de carbone). À cause de la saveur particulière de quelque unes on les a aussi appelées sucres ; on continue parfois à employer ce terme, mais on utilise aujourd'hui l'appellation glucides.

Parmi les extractibles responsables de l'incompatibilité des résidus lignocellulosiques avec le ciment le cas des sucres simples, dont le glucose, qui présente un fort pouvoir inhibiteur (Miller *et al.*1991). Ces sucres ont un pouvoir inhibiteur de prise et ont donc pour conséquence de retarder la prise du ciment et de diminuer la quantité des hydrates formés dans le composite durci (Govin *et al.* 2006).

Le tableau 8 présente la composition chimique et les proportions en pourcentage de chaque substance (cellulose, lignine, hémicelluloses, pectine et cire) des fibres végétales les plus utilisées dans le monde (Taj *et al.* 2007 ; Paiva *et al.* 2006).

Tableau 8: Composition chimiques de certaines fibres naturelles. (Dittenber *et al.* 2012)

Fibres	Cellulose (%)	Hémicellulose (%)	Lignine (%)	Pectine (%)	Cires (%)
Abaca	56-63	20-25	7-13	1	3
Alfa	45.4	38.5	14.9	- (5)	2
Bagasse	32-55.2	16.8	19-25.3	-	-
Bambou	26-65	30	5-31	8-10	-
Banane	63-67.6	10-19	5	-	-
Coir	32-43.8	0.15-20	40-45	3-4	-
Coton	82.7-90	5.7	< 2	0-1	0.6
Ananas	70.7-73.6	9.9	7.5-11.1		-
Lin	62-72	18,6-20,6	2,5	2,3	1.5-1.7
Chanvre	68-74.4	15-22.4	3.7-10	0.9	0.8
Agave	60-77.6	4-28	8-13.1	-	0.5
Isora	74	-	23	-	1.09
Jute	59-71.5	13.6-20.4	11.8-13	0.2-0.4	0.5
Kénaf	31-72	20.3-21.5	8-19	-	-
Orite	86	10	-	-	4
Palmier à l'huile	60-65	-	11-29		-
Ramie	68,6 - 85	13-16,7	0,5-0,7	1,9	0.3
Sisal	60-78	10-14.2	8-14	10	2.0
Henequen	77,6	4-8	13,1	-	

I.1.42. Propriétés des fibres végétales

La structure des fibres, les dimensions des cellules, les défauts et la composition chimique sont les principales variables qui déterminent toutes les propriétés des fibres. Les propriétés physiques des fibres naturelles sont principalement déterminées par leur composition chimique et physique, telle que la structure des fibres, la teneur en cellulose, l'angle des

microfibrilles, la section transversale et le degré de polymérisation le diamètre de la fibre, sa longueur L et le rapport L/d . De plus, la résistance et la rigidité des fibres augmentent avec l'augmentation de la teneur en cellulose et la diminution de l'angle du micro fibrilles. Par exemple, les fibres naturelles à forte teneur en cellulose et à faible angle de micro fibrille présentaient une résistance à la traction supérieure à celle des fibres naturelles à faible teneur en cellulose et à angle d'hélice élevé figures 11. Dans une autre étude, John et Thomas (John *et al.* 2008), de l'Inde ont découvert que les fibres végétales sont plus ductiles lorsque les microfibrilles sont orientées en hélice par rapport à l'axe de la fibre.

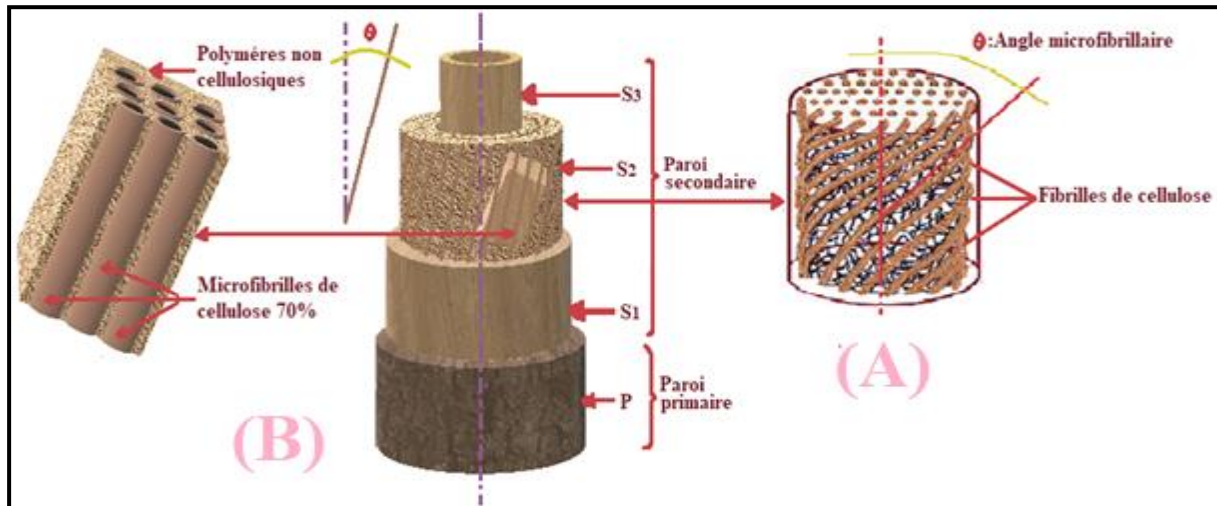


Figure 11: Présentation (A) de principe de la structure (Hearle, 1963) et (B) d'un microstructure (Baley, 2002) d'une fibre végétale

Les fibres végétales ont certaines restrictions d'utilisation, causé par la faible stabilité dimensionnelle, la mauvaise résistance au feu (se dégrade au-dessus de 200°C), la variabilité des propriétés dépendante à l'âge, la région et le climat, et affiliation et dépendance des fibres aux différentes cultures (propriétés en fonction de la qualité et de la variabilité du volume).

Malgré ça les fibres végétales possèdent des avantages biologiques, dégradabilité, faible densité, reproductibilité, propriétés mécaniques et isolation phonique, faible résidu d'incinération, faible empreinte carbone (El-Hilali, 2009).

Tableau 9: Propriétés physiques et mécaniques en traction de différentes fibres végétales (Dittenber *et al.* 2012 ; Maya Jacob John *et al.* 2008 ; Arrakhiz *et al.* 2012 ; Tan *et al.* 1997)

Fibres	Angle microfibrillaire (%)	Diamètre (μm)	Longueur (mm)	Rapport L / d	Module d'Young E (GPa)	Déformation (%)	Contrainte à la traction σ (MPa)	Densité (g/cm ³)
Abaca					5.2–20	1.0–10	400–980	1.5
Alfa	33	5 - 95	5 - 50	1964	12,7	1,6	75 – 154	1,51
Bagasse			10–300		17–27.1	1.1	222–290	1.25

Bambou			1.5–4		11–32	2.5– 3.7	140–800	0.6–1.1
Banane			300–900		12	1.5–9	500	1.35
Coir	30-49		20–150		2.8– 6	15–51.4	95–230	1.15–1.46
Coton	33	19	35	1842	5,5 – 12,6	7 - 8	287 - 597	1,5 – 1,6
Ananas			35		11.8– 96	1.3–4.9	87–1150	1.4
Lin	10	5 - 76	4 - 77	1687	58	3,27	1339	1,53
Chanvre	6.2	10 - 51	5 - 55	960	35	1,6	389	1,07
Agave			–		10.1–16.3	3.7–5.9	430–570	1.2
Isora			–		–	5–6	500–600	1.2–1.3
Jute	8	25 - 200	9 - 70	110	26,5	1,5– 1,8	393 – 773	1,44
Kénaf			–		14.5–53	1.5–2.7	223–930	1.4
Orite			–		38	1.7	650	–
Palmier à l'huile			–		0.5–3.2	17–25	80–248	0.7–1.55
Ramie	7.5	16 - 126	40 - 250	3500	51,4 - 128	1,2– 3,8	400 – 938	1,56
Sisal	20	7 - 47	0.8 - 8	100	9 – 21	3 – 7	350 – 700	1,45
Henequen					3.7–5.9	3.7–5.9	3.7–5.9	3.7–5.9
Coco	45	12 - 24	0,3 - 1	35	4 – 6	15 - 40	131 – 175	1,15
La soie d'araignée					~30	28-30	1300-2000	1,3
Fibre de verre					72	~2,5	1200-1800	2,5
Carbone					235	~2	~4000	1,4

I.1.43. Disponibilité des fibres végétales en Algérie

L'Algérie est un pays très vaste et possède une très grande diversité de flore tel que le liège, l'Alfa, Diss, Doum, dattes, pin, coton, etc. La production annuelle de liège en Algérie est d'environ 6000 tonnes. C'est le 6^e plus grand producteur de liège au monde. Par ailleurs, l'Alfa occupe environ 4 millions d'hectares de la surface de l'Algérie. Il est également intéressant de noter que l'Algérie compte 10 millions de palmiers dattiers. D'autre part, l'Algérie possède également des dizaines de milliers d'hectares de terres très riches en autres espèces de fibres telles que le Diss et le Doum. La colonisation française a conduit à la production de crin végétal à base de fibres de Doum en Algérie au début du XX^e siècle (Dallel, 2012 ; Kriker *et al.* 2005). Nous espérons qu'à travers cette recherche et les recherches similaires que cette richesse en fibres végétales soit exploitée largement et intégrée dans l'industrialisation du bâtiment et des travaux publics, pour augmenter la cadence économique en dehors des matériaux pétroliers fossiles.

I.1.44. Synthèse bibliographique sur l'incorporation des fibres végétales dans la construction

Les fibres végétales, représentent une alternative prometteuse aux fibres synthétiques traditionnelles comme renfort de matrices minérales dans les matériaux composites de construction à cause de :

La production de fibres végétales est moins polluante que celle des fibres synthétiques, ce qui réduit l'empreinte écologique.

Les fibres végétales ont des propriétés mécaniques spécifiques proches de celles de la fibre de verre, tout en étant plus légères.

Les fibres végétales sont recyclables et biodégradables.

Cependant, la bibliographie met en évidence une perte de résistance et de ductilité des fibres végétales en milieu alcalin, due à une décomposition partielle de leurs constituants (lignine, hémicelluloses). Ce phénomène dépend de la nature des fibres considérées.

Les propriétés à long terme des composites incorporant des fibres végétales résultent de la combinaison de différents mécanismes modifiant les propriétés de l'interface fibre/matrice. Des traitements des fibres peuvent être appliqués pour améliorer leur compatibilité avec la matrice, mais cela réduit le gain de masse permis par leur utilisation.

En conclusion, les fibres végétales, présentent un fort potentiel comme renforts écologiques dans les matériaux composites de construction à matrice minérale. Cependant, des efforts de recherche sont encore nécessaires pour optimiser leurs performances et leur durabilité.



Deuxième Chapitre

Chapitre II

II. Caractérisations, traitement et mode opératoire des matériaux utilisés

Dans ce chapitre nous avons étudié les caractéristiques et les composants détaillés des matériaux utilisés pour obtenir les bio-composites : les matrices (ciment, argile), les renforts (l'Alfa, Diss).

Nous avons également détaillé les solutions qui ont été utilisées pour traiter les matériaux susmentionnés : eau de mer, eau du réseau.

II.1. Caractérisations des matériaux

II.1.1. Matériaux utilisés pour renfort ; fibre d'Alfa et de Diss

Dans ce travail de recherche, nous avons utilisé les plantes végétales naturelles d'Alfa et de Diss (figure 12) transformées en tiges, puis en fibres longitudinales à l'aide d'un broyeur électrique à couteaux.



Figure 12: Plantes végétales d'Alfa (*Stipa tenacissima*) du Diss (*Ampledosma mauritanica*), à l'état naturel de la région de Souk Ahras/Algérie.

La plante naturelle sous forme de tige n'adhère presque pas avec le ciment pour élaborer un composite résistant, pour cela nous avons procédé à la transformation des tiges en fibres à l'aide du broyeur électrique. Malgré cela ces fibres naturelles broyées interagissent mal avec la matrice cimentaire à cause des substances hydrosolubles qu'elles renferment, pour cela nous avons procédé à l'atténuation de ces effets par l'ébullition ou par immersion dans l'eau de mer.

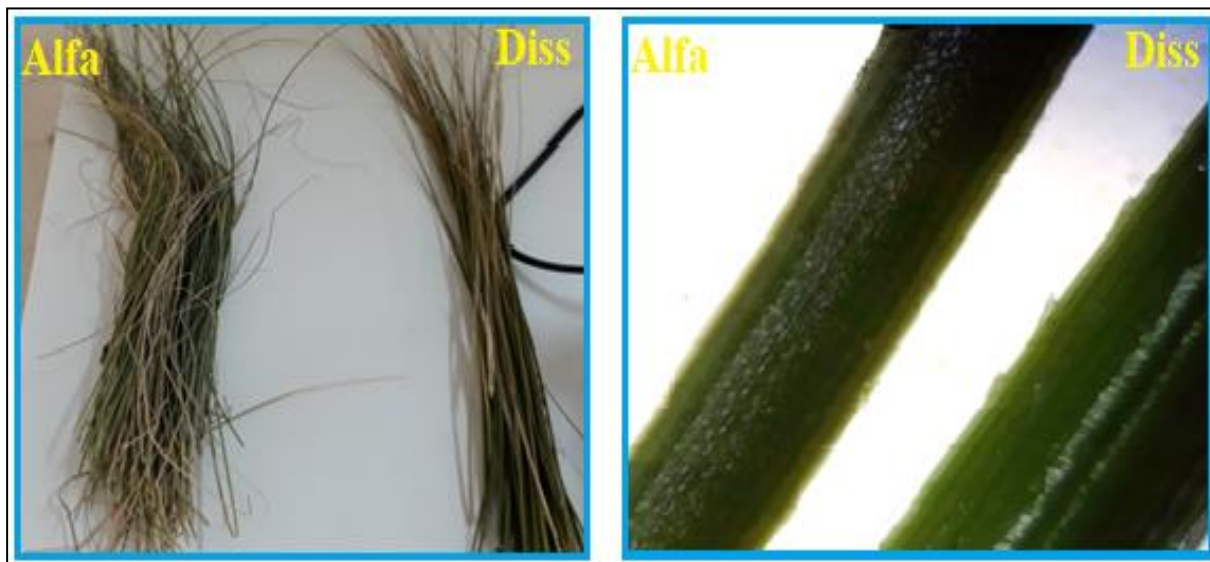


Figure 13 : Touffes d'Alfa et de Diss, Tige d'Alfa de Diss naturel vue microscope optique.



Figure 14 : présentation des fibres d'Alfa et de fibres de Diss après le broyage.

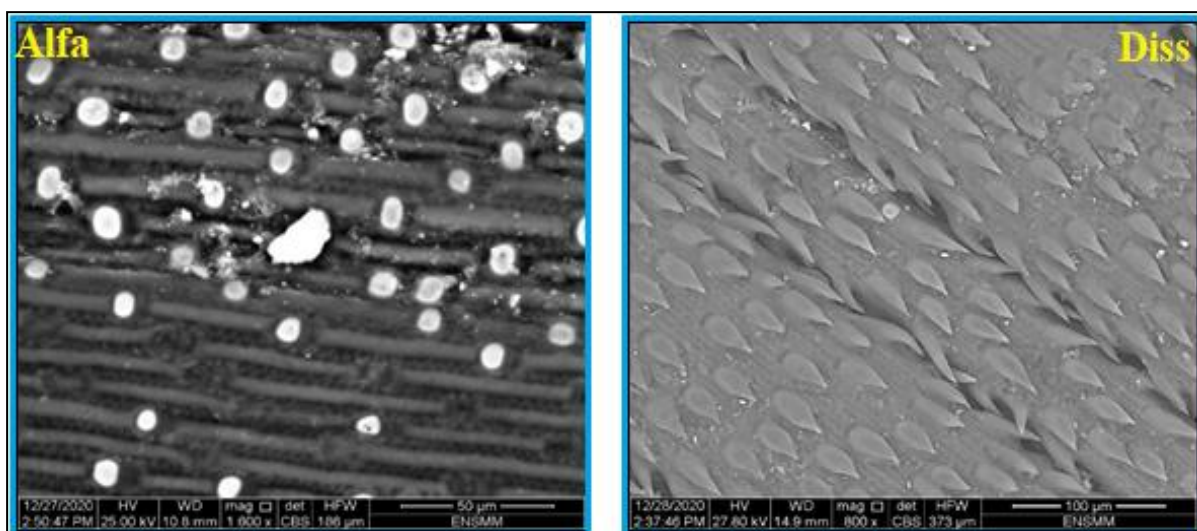


*Figure 15: Vue à la microscopie électronique de fibre bouillie (d'Alfa et Diss)
agrandissement $\times 800$.*

Les vues au microscope électronique à balayage de la figure 15, montrent la présence des épines le long de la tige et de la fibre bouillie du Diss, alors que les fibres d'Alfa, présentent une face externe lisse, et formées de fibrilles longitudinales.

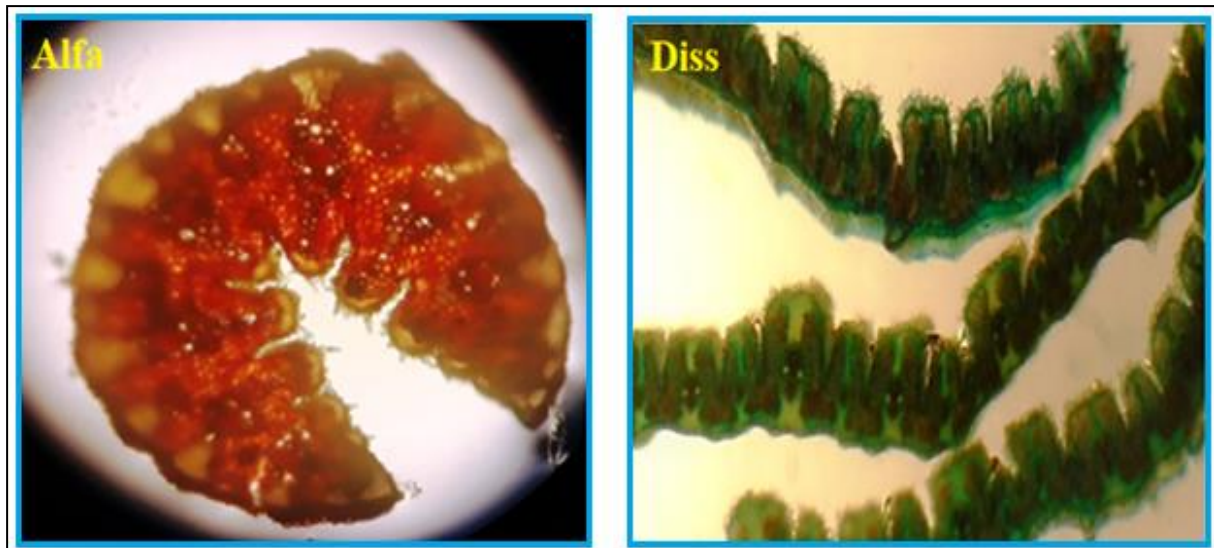


Figure 16: Vue d'un microscope optique d'une coupe histologique transversale d'une tige d'Alfa et une tige de Diss

La figure 16 montre clairement le tissu des deux espèces et confirme la présence des épines sur les deux faces de la tige de Diss et sur la paroi interne de la tige de l'Alfa. Ces épines servent à la bonne adhérence des fibres dans la matrice cimentaire.

Les masses volumiques des fibres naturelles et bouillies broyées et utilisées dans nos mélanges sont représentées sur le tableau 10.

Tableau 10: Masse volumique des fibres d'Alfa et de Diss

Type de fibres	Alfa naturel (Kg/m3)	Alfa Bouilli (Kg/m3)	Diss naturel (Kg/m3)	Diss Bouilli (Kg/m3)
Masse volumique	26.25	24.09	26.79	25.18

II.1.2. Ciment

Le ciment utilisé dans notre recherche se nomme “ Matine“ est le nom commercial du ciment gris portland au calcaire, nous l'avons utilisé comme matrice pour l'élaboration des bio-composites fibrés. Il est de type NA442 CEM II/ A-L42.5N, certifié conforme à la norme Algérienne (NA442- 2013) et Européenne (EN 197-1) fabriqué par la cimenterie Lafarge de M'sila, Algérie. Ce matériau est caractérisé par des critères normalisés appliqués sur la poudre, la pâte et le mortier défini par la norme NF EN 196-1)

II.1.3. Composition chimique du ciment

Le ciment Matine est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO₂) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al₂O₃) et le fer (Fe₂O₃). Sa composition chimique et minéralogique est résumée dans le tableau 11

Tableau 11: Composition chimique et minéralogique de Matine (Fiche technique)

Analyse chimique						
Désignation	Perte au feu %	Résidus insolubles	Teneur en sulfates SO ₃ %	Teneur en oxyde de Magnésium MgO %	Teneur en chlorures	Teneur équivalent en alcalis %
%	7.5 - 12	0.7 - 2	2 - 2.7	1 - 2.2	0.01 - 0.05	0.3 - 0.75
Désignation	Composition hypothétique du clinker					
%	C3S %	C2S %	C3A %		C3AF %	
	58 - 64	12 - 18	6 - 8		10 - 12	

II.1.4. Caractéristiques physico - mécaniques du ciment

Tableau 12: Caractéristiques physico - mécaniques du ciment (Résultats des tests appliqués au laboratoire)

Masse volumique apparente (kg/m ³)		894.47
Masse volumique absolue (kg/m ³)		2924
Consistance normale (%)		w = 26.32 (131.6 g)
Temps de début de prise (min)		145
Temps de fin de prise (min)		235
Résistance à la compression (MPa)	28 jours	42.52

Les résultats montrent que le ciment est conforme aux exigences de sa classe CEM II/B 42.5. Ces valeurs s'insèrent dans les intervalles indiqués par le tableau 12.

Tableau 13: Caractéristiques physico - mécaniques du ciment NA 442 (Fiche technique de ciment MATINE) (www.lafargealgerie.com).

Propriétés physiques	Consistance normale (%)	25 – 28,5
	Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA 231)	3750 – 5250
	Retrait à 28 jours en µm/m	< 1000
	Expansion en mm	0,3 – 2,5
Temps de prise à 20 °C (NA 230)	Temps de début de prise (min)	140 – 195
	Temps de fin de prise (min)	195 – 290
Résistance à la compression (NA 234)	2 jours (MPa)	≥ 10
	28 jours (MPa)	≥ 42,5

II.1.5. L'argile et sa formation

L'argile est une matière imperméable d'une structure cristalline abondante dans la nature. Les argiles sont des minéraux de structure en feuillets composés en deux éléments, l'un est de forme tétraèdres de silice et le second est de forme octaèdres d'aluminium. Les différents types d'argiles sont formés par empilement par l'assemblage d'une ou deux couches tétraédriques à une couche octaédrique.

La formation des argiles passe généralement par les cinq étapes qui suivent :

1. Décomposition par érosion (pluie gel, dégel, eau de mer... etc.) de roches silicatées (gneiss, granites, schistes, laves),
2. Dégradation puis destruction des roches silicatées en vases et limons par l'action de l'eau et du gaz carbonique.
3. Transmutations des vases (transportés par les cours d'eau aux lits de rivières, lacs, mers, grands fonds océaniques) en argiles par la compaction, déperdition de l'eau de constitution et l'augmentation de la densité (augmentation de la pression et de la température).
4. Transformations des argiles en schistes argileux
5. Transformations des argiles après enterrement dans les profondeurs des lacs, rivières et océans en feldspaths et en silicates (accumulation de sédiments dans un cours d'eau par excès de transport par l'eau) d'ions minéraux argileux (Villieras, 2008).

Nous avons utilisé pour l'élaboration du composite d'argile renforcé par des fibres végétales (alfa et disse) une argile composée de 50% de la Kaolinite et de 50% de la montmorillonite. Cette argile provient de Djebel Zaarouria (Souk-Ahras) après séchage et

broyage au sein de la briqueterie Taghaste située à la commune de Zaarouria au sud de la willaya de Souk-Ahras, elle est utilisée pour la production de la brique.



Figure 17: photo des fibres d'Alfa et d'argile broyée employés pour la fabrication des briques et des tuiles.

II.1.6. Composition chimique de la Montmorillonite

La montmorillonite est une argile groupée sous la famille de smectite, elle est très répandue sur la surface du globe, son nom vient d'une localité française Montmorillon, elle est utilisée principalement pour ses qualités colloïdales qu'elle procure, préparée en broyage jusqu'à obtention d'une poudre fine, on l'emploie dans une multitude de domaines dont la fabrication des briques et des tuiles.

La montmorillonite est un minéral composé de silicate d'aluminium et de magnésium hydraté de formule : $(\text{NaCa})_{0.3}(\text{Al Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Elle appartient à la famille des phyllo silicates.

La montmorillonite est une argile dite TOT (disposition d'une couche octaédrique placée entre deux couches tétraédrique), a une distance basale qui varie de 14 à 17Å° (Angstrom), cela signifie qu'un feuillet de la montmorillonite est formé de 3 couches, une Octaèdre AL (OH)-50 et deux Tétraèdres

Elle détient une forte concentration en silice, en minéraux, dont de la potasse, des oxydes de magnésium, de fer, de manganèse, d'aluminium, de la soude, (Segad *et al.* 2010).

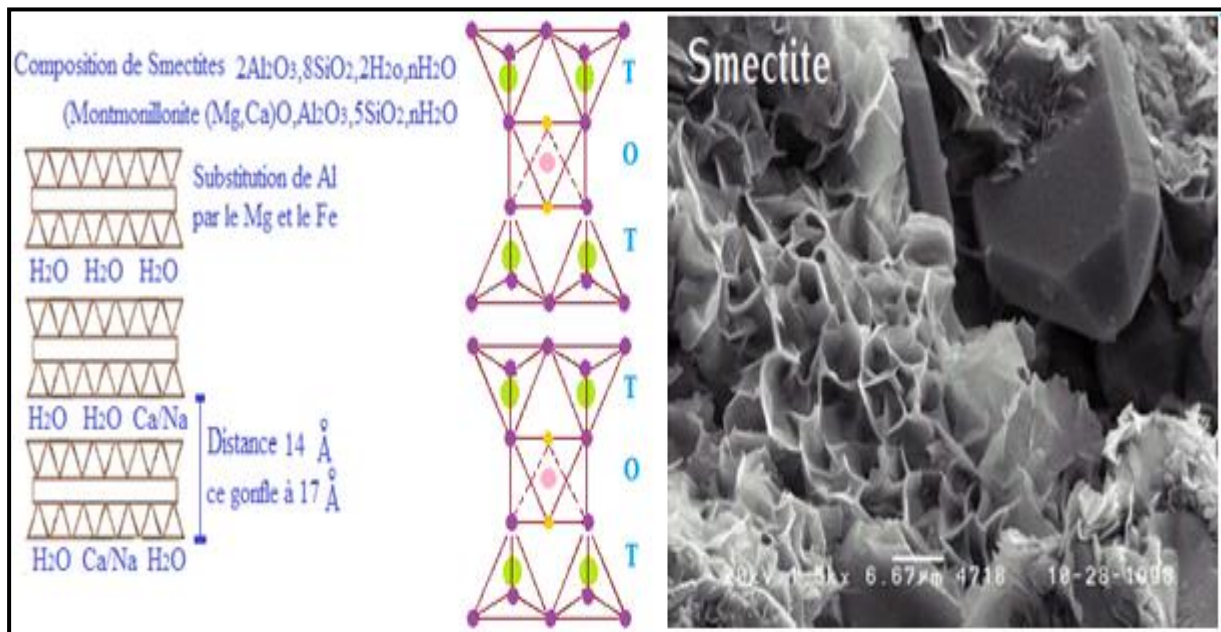


Figure 18: Photo en MEB et représentation schématique de la structure de la montmorillonite

II.1.7. Composition chimique de la Kaolinite

La Kaolinite est une argile de type TO de formule chimique $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ minéral à 2 couche d'une distance basale presque de 7 Å (Angstrom), cette roche est riche en feldspath, elle présente une forte teneur en alumine (46%), montre des propriétés de plasticité de faible retrait au séchage et à la cuisson. Cette argile blanche, douce, friable, réfractaire, contient autant d'aluminium que de silice (Merabet *et al.* 2003)

Riche en silice et peu concentrée en sels minéraux, elle est utilisée pour la fabrication de porcelaine et de céramique. C'est une des rares argiles inerte chimiquement, Liétard 1977).

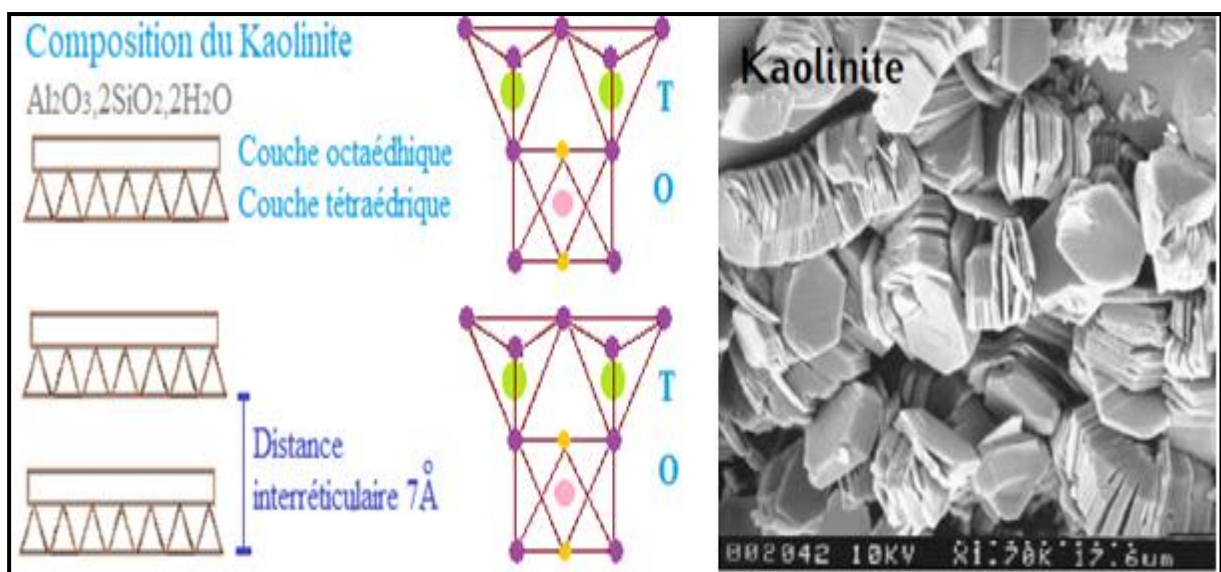


Figure 19: Photo en MEB et représentation schématique de la structure de la kaolinite

II.1.8. Caractéristiques physico – chimiques de la kaolinite et la montmorillonite

Les propriétés physico - chimiques de la kaolinite et la montmorillonite sont présentées sur le tableau 14 qui suit.

Tableau 14: Caractéristiques physico - chimiques de la kaolinite et la montmorillonite (Bouabid et al. 2016)

	Masse volumique	Masse molaire g/mol	Surface spécifique m²/g
Montmorillonite	2.12 – 3.00	814	800
Kaolinite	2,4 / 2,65	258	10 / 22

La masse volumique de l'argile utilisée (le mélange de la kaolinite et la montmorillonite) comme matrice pour l'élaboration des bio composites argileux fibrés est déterminée par les tests appliqués au laboratoire et représentés sur le tableau 15

Tableau 15: Masse volumique de l'argile utilisée (Résultats des tests appliqués au laboratoire)

Masse Volumique Apparente	Moyenne arrondie des trois essais
Argile	820 kg/m³
Chaux	641,5 kg/m³

Tableau 16: La composition chimique de la Kaolin et la Montmorillonite (Bouabid et al. 2016).

	SiO₂ en %	Al₂O₃ en %	Fe₂O₃ en %	MgO en %	K₂O en %
Kaolinite	45,48 / 53,72	37,3 / 46,28	0,06 / 0,77	0,17	0,42
Montmorillonite	48,24 / 61,47	16,54 / 23,00	0,30 / 4,32	0,03/ 4,65	0,12/ 0,84

II.1.9. La Chaux

La chaux est un matériau obtenu par la cuisson des roches calcaires (CaCO₃) ou dolomitiques (association de CaCO₃ et MgCO₃) à une température comprise entre 900 et 1200 °C suivie d'une extinction à l'eau, durcissant lentement à l'air

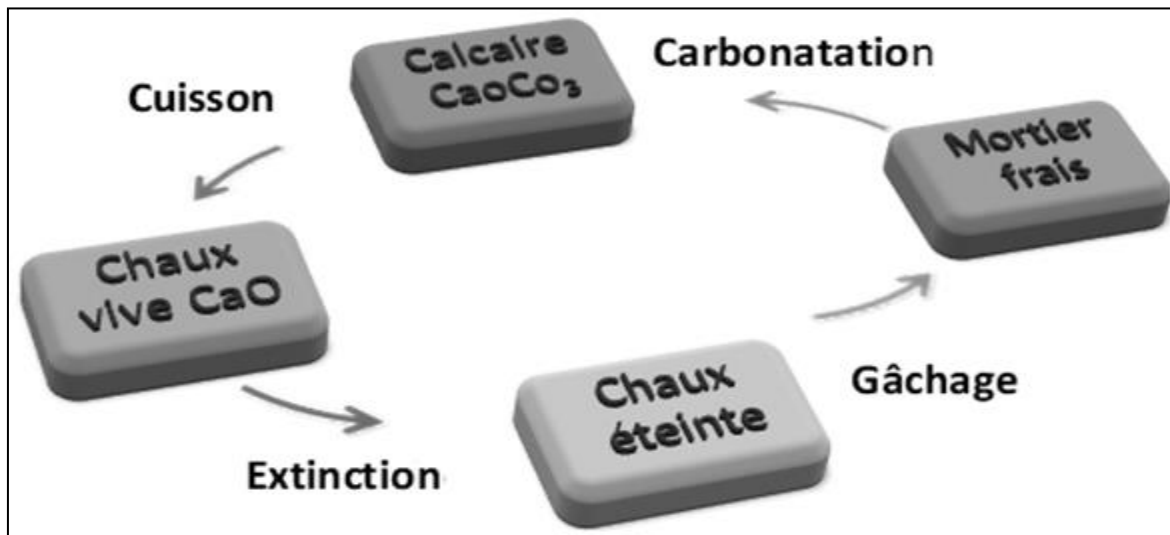


Figure 20 : cycle de la chaux

II.1.10. Composition chimique et caractéristiques physique de la Chaux

Dans notre recherche, nous avons utilisé la chaux éteinte (Hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$) qui répond à la norme NF EN 459. (2012) fabriquée par l'usine Cevital minerals d'El Khroub – Constantine, sa composition chimique et ses caractéristiques physiques sont résumées dans les tableaux 17 et 18.

Tableau 17: Composition Chimique de la chaux (d'après la fiche technique jointe établie par le constructeur) (www.cevital-minerals.com).

Compositions	Quantité	Unités
Hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Totale	98,61	g/kg
Hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Soluble	94,57	g/kg
pH	12,4	-
Humidité	< 1	g/kg
Oxyde de Fer (Fe_2O_3)	0,0093	g/kg
Oxyde d'Aluminium (Al_2O_3)	0,0182	g/kg
Oxyde de Magnésium (MgO)	< 0,2	g/kg
Oxyde de Manganèse (Mn_3O_4)	0,0015	g/kg
Oxyde de Silicium (SiO_2)	0,0477	g/kg
Fer (Fe)	0,0065	g/kg
Aluminium (Al)	0,0096	g/kg
Silicium (Si)	0,0223	g/kg
Manganèse (Mn)	0,0011	g/kg
Dioxyde de carbone (CO_2)	< 1	g/kg

Tableau 18: Caractéristiques physiques de la chaux éteinte utilisée (fiche technique joint établie par l'usine Cevital minerals d'El Khroub – Constantine) ([www. cevital-minerals.com](http://www.cevital-minerals.com)).

Désignation	Valeurs
Finesse	88,39% $\leq$ 80 μ m
Densité Absolue	2460 kg/m ³
Densité apparente	460 kg/m ³
Aspect	Poudre blanche, fine et inodore

II.1.11. Effet du contact de la chaux avec l'argile

Plusieurs études ont montré que l'ajout de la chaux à tous les types d'argiles entraîne des successions d'interactions argile-chaux qui dépendent fortement de leur nature et les mécanismes sont principalement l'échange cationique suivi de la réaction pouzzolanique (Lasledj, 2009 ; Khattab *et al.* 2007 ; Al-Rawas *et al.* 2006), tel que la montmorillonite (argile gonflant) présente une capacité très importante d'échange cationique tandis que la kaolinite (argile non gonflante) elle présente une capacité d'échange cationique relativement basse.

Lorsqu'on ajoute la chaux à l'argile en présence de l'eau de gâchage provoque une interaction entre eux qui se fait par une succession de processus physico-chimiques complexes qui modifient le comportement de l'argile. Cette interaction se résume comme suit, la dissolution de la chaux libère des cations de calcium Ca²⁺ et des hydroxyles (OH)⁻, qui sont instantanément adsorbés et intercalés dans l'espace interfoliaire des smectites (structure TOT) et remplacent les différents cations inter-foliaires existants ce qui réduit la double couche d'eau diffuse (Arabi *et al.* 1989). Cet échange cationique fait disparaître les couches d'eau interfoliaire, par conséquent cette floculation - agglomération modifie la structure de l'argile et améliore la consistance de la matrice argileuse. Cette dissolution de la chaux en présence d'eau de gâchage fournit un milieu à haut pH (12,4), ce milieu basique et saturé en cation de calcium, sert à dissoudre l'alumine et la silice de l'argile qui réagissent avec le calcium et les hydroxyles provenant de la chaux pour former des hydrates calciques similaires à ceux des ciments, hydrate d'aluminate calcique et hydrate aluminosilicate calcique (Bell, 1996 ; Locat *et al.* 1996). Une partie de la chaux disponible pour la réaction pouzzolanique est consommée après la formation des carbonates (Carbonatation ou formation de la calcite) tels que CaCO₃, MgCO₃, par la réaction de la chaux avec le CO₂ atmosphérique, ce phénomène réduit par conséquent la résistance de la matrice argileuse. (Khattab *et al.* 2002 ; Cabane, 2004).

En résumé, l'ajout de la chaux dans des matrices argileuse joue un rôle positif pour l'augmentation de la résistance et l'amélioration de ses caractéristiques.

Pour confirmer cette approche nous avons élaboré des bio composites par une matrice composée de 50% d'argile et de 50% de la chaux renforcé par des fibres naturels (Alfa et Diss) bouilli et non bouilli.

II.1.12. L'eau

Le contact direct de l'eau avec le ciment anhydre provoque principalement le processus de l'hydratation de ciment et influe sur la résistance mécanique du béton ou du composite.

L'eau gâchée qui rentre dans le phénomène d'hydratation du ciment porte deux appellations ; la quantité consommée dans cette action est nécessaire à la constitution de l'hydrate et est appelée l'eau liée chimiquement à l'hydrate car il rentre dans la composition de l'hydrate (la présence d'eau sert à hydraté le silicate tricalcique (C_3S) qui donne $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 5H_2O$), et l'eau liée physiquement à l'hydrate est celle piégée à l'intérieur des pores de l'hydrate. Quant au reste de la quantité qui n'est pas encore consommée elle est appelée eau libre.

Cette eau libre rentre dans la pâte de ciment par l'application des forces de surface créées par la finesse de ciment et aux dimensions des pores du ciment hydraté, cette eau libre peut aussi être vaporisée dans certaines conditions (R. Dupain ; J.-C. Saint-A, 2009)

II.1.13. Eau de gâchage

Le gâchage a été effectué par l'eau potable du réseau de la région de Souk-Ahras, sa composition chimique a été déterminée au sein du laboratoire de la société Algérienne des eaux « unité de production de Ain-Dalia». Les principaux composants chimiques de l'eau du réseau sont illustres sur le tableau suivant :

Tableau 19: Composition chimique de l'eau du robinet réseau de la région de Souk-Ahras

Composants	Unité	Norme algérienne	Résultats
pH	-	6,50-8,50	7.68
Température	°C	/	16.00
Conductivité à 25°C	µS/cm	3125	573,00
Cl₂	mg/l	/	0,80
Dureté (TH)	°C	500	20,00
Turbidité	NTU	5	1,05

Oxygène O₂	mg/l	8	9,25
Titre alcalimétrique complet	°F		14,00
Magnésium (Mg⁺²)	mg/l	150	10,00
Ca⁺²	mg/l		70,00
Cl⁻	mg/l		53,50
NH₄⁺	mg/l		0,00
NO₃	mg/l		0,00
PO₃	mg/l		0,00
Bicarbonates (Hco₃⁻)	mg/l	/	170,00

II.1.14. L'eau de mer

L'eau de mer est caractérisée par :

➤ Le pH est un paramètre essentiel qui caractérise les eaux salines car il donne une indication sur l'alcalinité ou l'acidité d'une eau. L'eau de mer que nous avons utilisé dans cette étude pour traiter les fibres (Alfa, Diss) par immersion était prélevée au mois d'octobre de la plage Ain Achir (Annaba) avait un pH de 7,8, tandis que les eaux prélevées au mois de mai pour conserver les composites élaborés sont de la même plage mais d'un pH de 8,1. Cette variation de pH est due probablement au changement de la saison. Plusieurs études ont confirmé cette variation, qui rentre dans la norme, car le pH des eaux de mer sont de nature neutre.

➤ L'eau de mer est caractérisée principalement aussi par sa salinité qui nous donne la concentration de sels dissous, particulièrement le chlorure de sodium (sel de table), mais également d'autres sels comme le sulfate de magnésium et le carbonate de calcium. La salinité est le reste des sels après l'évaporation de l'eau de mer, et des apports des rivières et des sources hydrothermales qui y déversent continuellement des minéraux. L'équilibre de la salinité peut être influencé par des facteurs tels que les variations climatiques, et les changements dans le cycle de l'eau (Lalli *et al.* 2018).

➤ La composition chimique de l'eau de mer est exprimée en parties par million (ppm), ce qui équivaut à des concentrations en milligrammes par litre (mg/L). L'estimation des proportions des principaux composants chimiques de l'eau de mer, d'après les scientifiques du domaine est mentionnée sur le tableau 20.

Tableau 20: Composition physico-chimiques de l'eau de mer de la région d'Annaba (baie d'Annaba et littoral d'Annaba)

Paramètre	Valeurs observées	Unité	Référence
Température	14,0 – 25,8	°C	Frehi et al. (2007)
pH	8,1 – 8,4 (moyenne $\approx$ 8,30)	-	Hidouci et al. (2018)
Salinité	35,1 – 37,5	psul (g/L)	Frehi et al. (2007)
Salinité (plages influencées par les apports continentaux)	25,1 – 39,2	psul (g/L)	Hidouci et al. (2018)
Oxygène dissous (saturation)	80 – 120	% saturation	Hidouci et al. (2018)
Ammonium (NH_4^+)	0,2 – 4,5 (selon saison et station)	$\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	Frehi et al. (2007)
Nitrates (NO_3^-)	0,1 – 5,5	$\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	Frehi et al. (2007)
Phosphates (PO_4^{3-})	0,05 – 1,20	$\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	Frehi et al. (2007)
Chlorophylle a	0,1 – 5,8	$\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	Frehi et al. (2007)
Transparence	Variable selon les apports terrigènes et la saison	m	Hidouci et al. (2018)

Les concentrations relatives des différents composants chimiques dans l'eau de mer restent assez constantes, bien qu'elles puissent varier légèrement en fonction des facteurs locaux tels que l'évaporation, les apports fluviaux, et l'activité biologique.

II.1.15. Traitements et méthodes expérimentales

Cette section explique les deux méthodes de traitement appliquées sur les fibres végétales (Alfa, Diss), la première méthode consistait à les faire bouillir et la seconde à les immerger dans l'eau de mer.

Nous avons également expliqué les différentes étapes des expériences que nous avons mené, notamment en essayant de déterminer le pourcentage de sucre présent dans les fibres, tout en expliquant et en clarifiant les différentes variétés de formulations ainsi que les méthodes d'élaboration des nouveaux matériaux (bio-composites) qui ont ensuite été soumis à des expériences de caractérisations mécaniques

II.1.16. Traitement des fibres

Les méthodes de traitement des fibres sont choisies selon les objectifs tracés. Après la récolte des tiges des plantes (Alfa et Diss), celles-ci sont exposées à l'air libre pour être séchées. Ensuite ces tiges sont broyées longitudinalement à l'aide d'un broyeur électrique de type Retsch doté de d'une lame à maille de 10 cm. Une partie des fibres obtenues seront soumises à un traitement hydro-thermique (ébullition durant quatre heures de temps dans l'eau du réseau) et l'autre partie subira le traitement d'immersion à l'eau de mer en vue d'éliminer les substances

organiques indésirables qui présentent un inconvénient vis à vis des caractéristiques mécaniques, comme les sucres.

II.1.17. Méthode et étapes expérimentales

Après l'étape de la préparation et de différents traitements des fibres suscitées, que nous avons adopté pour l'élaboration des composites cimentaires à base des fibres végétales (Alfa et Diss) par la composition volumétrique, en introduisant tous les composants à des volumes différents calculer et ceux pour un souci d'avoir des formulations adéquate pour l'amélioration de la résistance mécanique de ces composites.

Pour aboutir aux résultats escomptés, il faut passer par les étapes essentielles représenter sur les photos qui suivent :

1. On cueille la plante sous forme de tiges.
2. On passe les tiges au broyeur de type Retsch, avec une maille de 10 mm à couteaux à découpe parallèle.
3. On les transforme en fibres longitudinales.
4. On procède au traitement chimique par ébullition ou par immersion dans l'eau de mer.
5. On élabore les composites à base des fibres d'Alfa et de Diss
6. On procède à l'essai de résistances et l'interprétation.



Figure 21: Différentes étapes essentielles d'élaboration des composites

II.1.18. Dosage des sucres totaux par la méthode de phénol-acide sulfurique

Les sucres totaux présents dans les différents échantillons étudiés sont déterminés par la méthode colorimétrique de (Dubois *et al.* 1956).

II.1.19. Principe

En milieu acide et à chaud, les liaisons glycosidiques des carbohydrates sont hydrolysées. Les oses simples ainsi libérés subissent une déshydratation intramoléculaire pour des dérivés furfuraux (furfural ou hydroxy méthyl furfural). La fonction aldéhyde des furfuraux se condense ainsi en milieux acides avec l'hydroxyle d'un composé phénolique pour donner des acétals ou hémiacétals de couleur rougeâtre qui absorbent dans le visible (450-500 nm). Cette méthode permet ainsi de doser tous les glucides totaux d'un matériel biologique.

II.1.20. Mode opératoire

Un volume de 200 μL de la solution utilisée contenant les solubles extraites des différentes fibres broyées est placé, dans un tube à essai auquel on additionne 200 μL d'une solution aqueuse de phénol à 5%. Le milieu réactionnel est mélangé à l'aide d'un vortex après addition de 1 mL d' H_2SO_4 à 96% puis le mélange est à nouveau homogénéisé vigoureusement au vortex. Après 30 min de repos à température ambiante, les absorbances sont de l'ordre de 490 nm. L'absorbance est calculée puis convertie en équivalent en concentration de glucose à l'aide d'une courbe d'étalonnage établie avec du glucose comme standard dans les mêmes conditions expérimentales.

II.1.21. Méthode de formulation des bio-composites

La méthode de formulation vise à trouver la formule optimum et adéquate des bio-composites cimentaires fibrés (Alfa et Diss). Pour cela, nous avons adopté quatre compositions basées sur différents rapports volumiques. La première formulation est de mélanger trois volumes de fibres naturelles avec trois volumes de ciment, la deuxième est de mélanger quatre volumes de fibres avec deux volumes de ciment, pour la troisième mélanger cinq volumes de fibres avec un volume de ciment. Une formulation composée uniquement de six volumes de ciment gâché en introduisant uniquement de l'eau servira comme étalon. Ces méthodes d'élaboration des bio-composites sont résumées sur le tableau suivant.

Tableau 21: formulations des bio-composites

Formulation des bio-composites				
Bio-composites	Fibre (Alfa ou Diss)	Ciment	E/C (eau/ciment)	Formulation
	3/6	3/6	0,40	3 : 3 :0,40
	4/6	2/6	0,45	4 :2 :0,45
	5/6	1/6	0,50	5 :1 :0,50
Étalon	0/6	6/6	0,35	0 :6 :0,35

Après le choix des volumes de substitution des fibres (fibres séchées auparavant à l'air libre) d'Alfa et de Diss suivant les formulations du tableau 21, nous avons confectionné des éprouvettes à base de ces fibres dans des moules de dimensions 4x4x16 cm.

Éclaircissement

Le moule adopté pour l'élaboration des échantillons des composites et d'une forme prismatique (4x4x16) cm³, ce même moule a été utilisé lors des études semblables citées ci-dessus, les fibres utilisées doivent être séchées (séchage à l'air libre).

Avant de commencer le façonnage des composites on doit d'abord calculer le volume de ce moule. La quantité de fibres ainsi que de ciment qui correspondent aux rapports des volumes, 3/6, 4/6 et 5/6 du moule (4x4x16) cm³ sera convertis en poids (la masse volumique de Diss et de l'Alfa et ciment sont calculées auparavant au laboratoire comme indiqué au tableau 21). Le malaxage du mélange se fait manuellement et lors de la mise en place du mélange dans les moules prismatiques les fibres sont placées longitudinalement).

II.1.22. Elaboration des bio-composites et essais mécaniques

Après malaxage des mélanges dans un malaxeur à mortier, nous avons procédé à la vibration à la table à choc. Les éprouvettes confectionnées sont placées dans la chambre humide jusqu'à 28 jours. A la fin de la cure, les éprouvettes seront placées dans l'étuve à 50°C jusqu'à masse constante.

Les résistances mécaniques en traction par flexion trois points ont été déterminées, suivant la norme EN 196-1, sur des éprouvettes prismatiques 4 x 4 x 16 cm. Ces essais sont réalisés sur un banc d'essai de traction par flexion de marque Zwick/Roel de type BT1-FR020THW.A50 de capacité de 20 KN (figures 22 et 23), spécialement conçu pour ce type de matériaux, relié à un système d'acquisition de données automatique.

Les moitiés des éprouvettes testées en flexion ont été utilisées pour des essais de compression à l'aide de la presse de type BeraTest de capacité 2000 KN (figure 22)

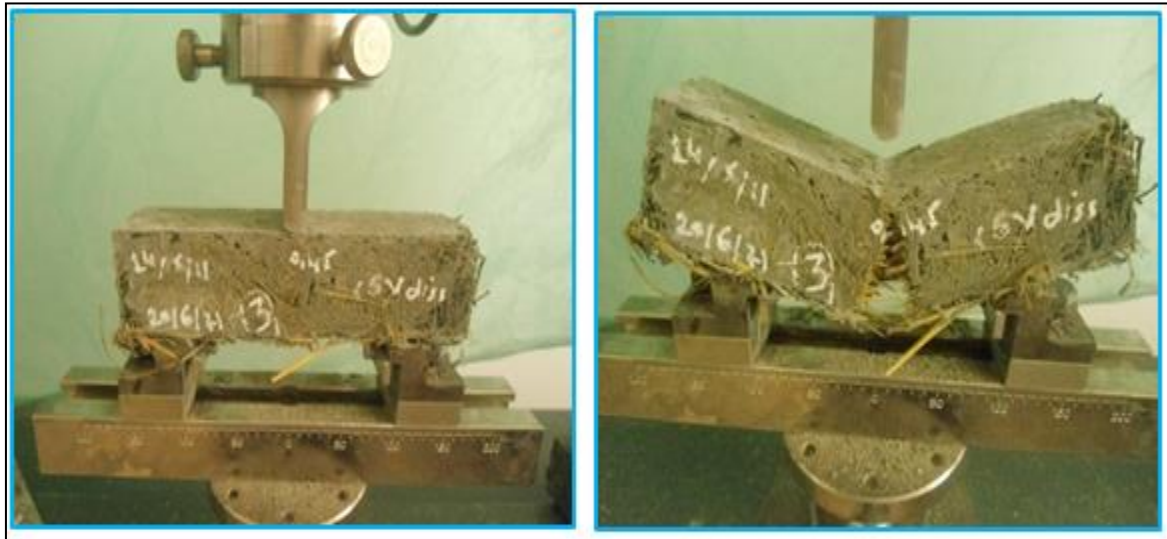


Figure 22: Essais de flexion sur les bio-composites fibrés (Zwick/Roell KN 20).

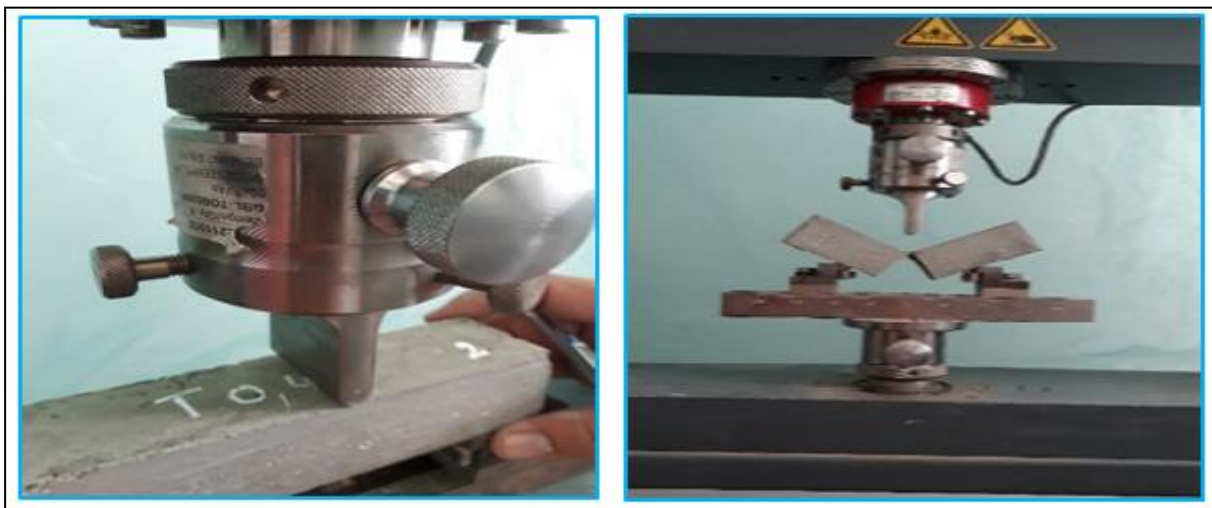


Figure 23: Essais de flexion sur l'étalon en ciment (Zwick/Roell 20 KN).



Figure 24: Presse universelle BeraTest 2000 KN).

II.1.23. Caractérisations par imagerie au microscope électronique à balayage MEB

La morphologie des échantillons au niveau des zones de rupture a été réalisée au sein de l'école nationale supérieure des mines et métallurgie d'Annaba à l'aide d'un microscope électronique à balayage de type Quanta 250 FET. La technique de caractérisation par imagerie s'appuie sur l'interaction électrons-matière qui consiste à utiliser les émissions d'électrons par la surface des échantillons après avoir été bombardés par un faisceau d'électrons, un jeu de bobines de déflexion permet de déplacer le faisceau et donc de balayer l'échantillon, le contraste de l'image provient des effets topographiques, chimiques et structuraux, régissant la rétrodiffusion et l'émission secondaire voir les figures 25, 26 et 27 ci-dessus.

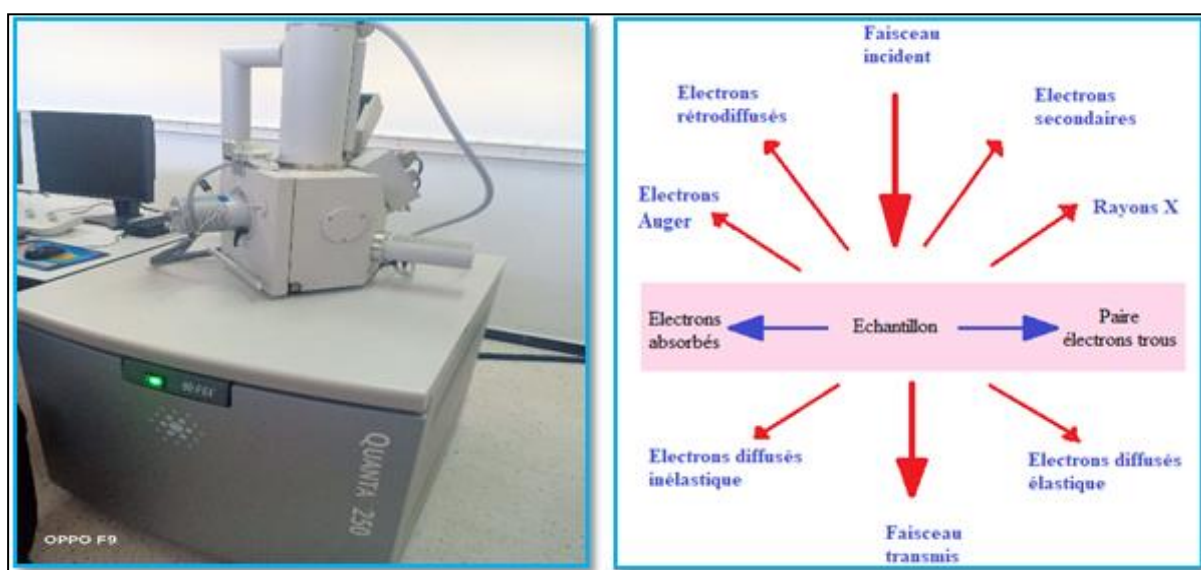


Figure 25: MEB Quanta 250 et schématisation du mode de fonctionnement



Figure 26: Mise en place des échantillons sur le platine porte-objet du MEB

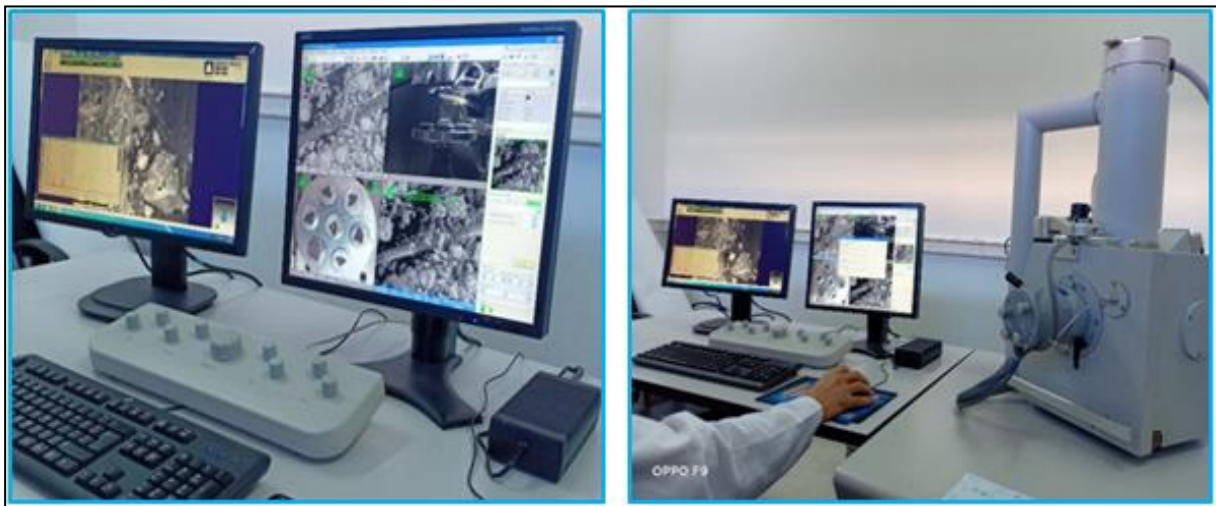


Figure 27: système d'acquisition et de traitement des informations du MEB.

II.1.24. Concept du retrait

Semblablement à toutes les recherches similaires présidentes, la présente a pour objective d'améliorer les caractéristiques mécaniques des bio-composites fibrés notamment la résistance mécanique (flexion, compression), mais il est nécessaire également de s'assurer que ce bio-composite durât par le temps.

Le retrait est les fissures (dû au plus faible rapport eau/ciment, teneur plus élevée en fines) observés immédiatement après le gâchage, pendant le temps de prise et durant le séchage du mortier ou de béton influent négativement sur la résistance, car ils permettent la pénétration des agents agressifs (eau pluviale pollutions, acide...etc.) dans l'élément constructif qui précipite par conséquence sa dégradation.

L'hydratation du ciment se suit par la création des pores capillaires (saturés en eau) dans le ciment hydraté. Ces pores s'assèchent par le phénomène d'hydratation et se transforme à des ménisques (le retrait apparait par les forces de traction qui se développent à l'intérieur des capillaires fines)

II.1.25. Mesure du retrait des bio-composites cimentaires fibrés

Afin d'évaluer le retrait, nous avons élaboré deux échantillons prismatiques de 4x4x16 des bio-composites pour chaque formulation ce qui nous a donné douze échantillons.

En application à la norme (NF P15-433), après malaxage des éléments constituant nos bio-composites cimentaires fibrés, nous avons rempli le bio-composite frais dans des moules équipés de plots de retrait en laiton vissés et détachés du moule avant le démoulage.



Figure 28 : Mesures du retrait

Après 24 heures nous avons démoulé les échantillons et nous avons commencé les mesures comme il est décrit suivant la norme mentionnée précédemment, à l'aide de l'appareil rétractomètre d'une précision de 0,005 mm montré sur la photo et les schémas présentés par les figures 34 et 35, les mesures de retrait ont duré 149 jours.

La mesure du retrait ou la variation relative de longueur consiste à évaluer les variations de $\Delta\ell/\ell$ en fonction du temps : $\xi(t) = \Delta\ell(t) / \ell$, avec :

ℓ : longueur de l'échantillon après démoulage après 24h

$\Delta\ell$: la variation de longueur à l'instant t

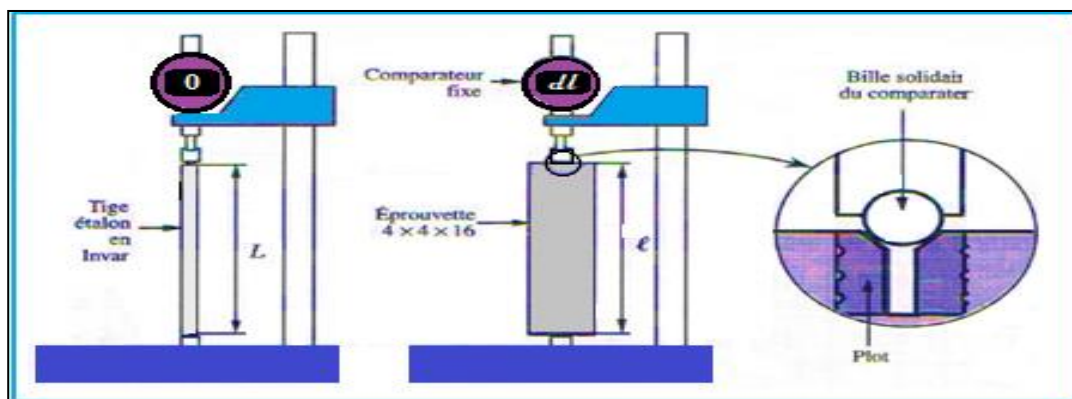


Figure 29 : Rétractomètre pour la mesure du retrait

II.1.26. Perte de masse

La perte de masse est due essentiellement à l'évaporation d'eau à cause de l'augmentation de la température. Cette perte est définie par le rapport $= (m_t - m_0)/m_0$ duquel

m_0 : masse de l'échantillon après démoulage

m_t : masse de l'échantillon à l'instant t

Pour conclure la perte de masse (%) = $\Delta M / M \times 100$

Les échantillons confectionnés pour les mesures de retrait sont les mêmes désignés pour les essais de mesure de la perte de la masse. Ces mesures ont été réalisées à l'aide d'une balance de $\pm 0,01$ g de précision.



Troisième

Chapitre

Chapitre III

III. Résultats et discussion

Dans ce troisième chapitre nous allons présenter et discuter les résultats des essais qui ont été menés dans cette recherche.

III.1.1. Détermination des sucres solubles

L'analyse de l'eau cumulée après les traitements appliqués sur les fibres de Diss et d'Alfa par la méthode de phénol-acide sulfurique a montré la présence des sucres solubles dans les différents échantillons comme montré sur la courbe illustrée sur la figure 30 ci-dessous.

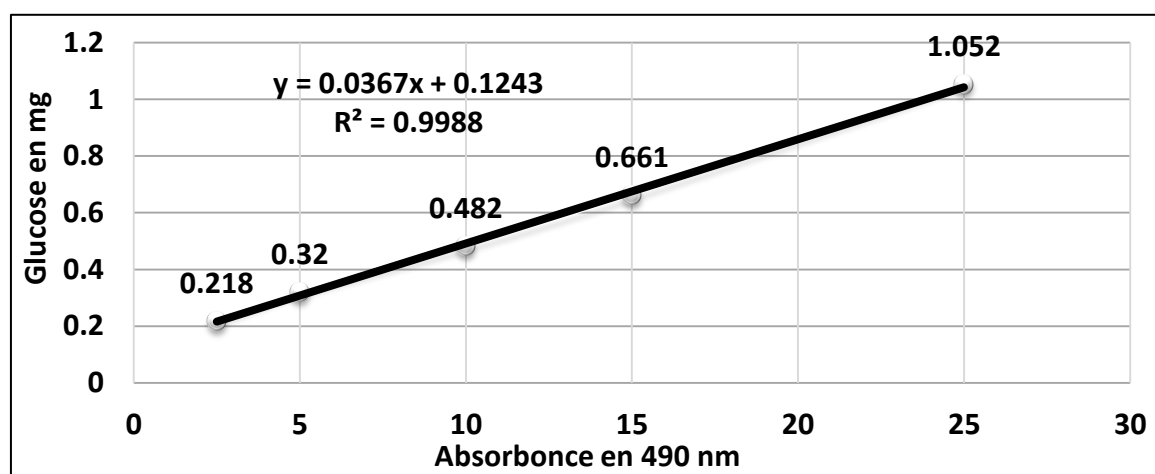


Figure 30 : Courbe d'étalonnage de glucose (méthode de Dubois et al. 1956)

Tableau 22: Concentration de sucres solubles dans les échantillons étudiés d'Alfa

Echantillon	Concentration de sucres solubles (Microgramme)/ml	Taux de sucre restant dans les fibres en %
Alfa naturel (Tige)	570,95	100%
Alfa Broyé	362,23	63,44%
Alfa Broyé puis bouilli	162,23	28,41% / Tige naturelle 44,79% / Tige broyée
Alfa broyé puis immergé dans l'eau de mer		
Alfa / Eau de mer prélevé après 30 jours	309,37	54,18% / Tige naturelle 85,41% / Tige broyée
Alfa / Eau de mer prélevé après 60 jours	75,59	13,24% / Tige naturelle 20,86% / Tige broyée
Alfa / Eau de mer	43,71	7,65% / Tige naturelle

prélevé après 90 jours		12,07% / Tige broyée
Alfa / Eau de mer	34,71	6,08% / Tige naturelle
prélevé après 120 jours		9,58% / Tige broyée
Alfa / Eau de mer	24,36	4,27% / Tige naturelle
prélevé après 150 jours		6,73% / Tige broyée

Tableau 23: Concentration de sucres solubles dans les échantillons étudiés de Diss

Echantillon	Concentration de sucres solubles (Microgramme)/ml	Taux de sucre restant dans les fibres en %
Diss naturel (Tige)	909,37	100%
Diss Broyé	476,13	52,35%
Diss Broyé puis bouilli	203,65	22,39% / Tige naturelle 42,77% / Tige broyée
Diss broyé puis immergé dans l'eau de mer		
Diss / Eau de mer prélevé après 30 jours	329,96	36,28% / Tige naturelle 69,30% / Tige broyée
Diss / Eau de mer prélevé après 60 jours	133,35	14,66% / Tige naturelle 28,00 % / Tige broyée
Diss / Eau de mer prélevé après 90 jours	25,44	2,80% / Tige naturelle 5,34% / Tige broyée
Diss / Eau de mer prélevé après 120 jours	21,63	2,38% / Tige naturelle 4,54% / Tige broyée
Diss / Eau de mer prélevé après 150 jours	19,55	2,15% / Tige naturelle 4,11% / Tige broyée

À partir des essais biochimiques réalisés au laboratoire de l'université de Mohamed Cherif Messaadia de Souk-Ahras, appliqués sur les fibres broyées, nous avons remarqué que le taux de sucre a diminué dans les tiges après broyage d'une valeur significative de 47,65% pour le Diss et 36,56% pour l'Alfa. Tandis que pour les fibres bouillies elle a diminué de 57,23% pour le Diss et de 55,21% pour l'Alfa des taux initiaux dans les fibres broyée, qui sont respectivement de 77,61 % pour le Diss et 71,59% pour l'Alfa par rapport aux taux de sucres trouvés dans la tige naturelle.

D'après les résultats trouvés des concentrations des sucres solubles dans les échantillons étudiés il apparaît :

- Le Diss renferme dans sa tige une quantité supérieure de 62,79%, par rapport à celle renfermée dans la tige d'Alfa.
- Le broyage est un procédé qui permet la diminution du sucre renfermé dans les tiges de Diss et de l'Alfa.
- Les diminutions des taux de sucre dans les fibres de Diss et d'Alfa immergées dans l'eau de mer après les 60 premiers jours sont respectivement de 65,48% et de 46,6%, taux plus élevés que lors du traitement thermique par ébullition.

III.1.2. Détermination des masses volumiques des bio-composites cimentaires élaborés

La masse volumique de chaque bio-composite cimentaire élaboré à des différentes formulations est déterminé en application à la norme EN1097-6.

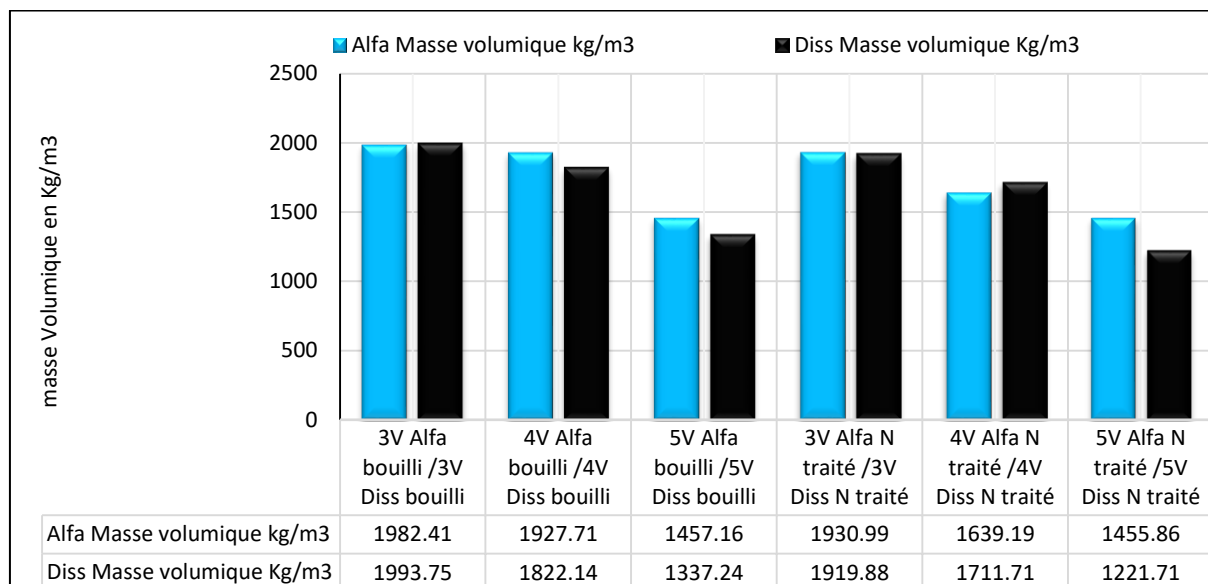


Figure 31: Histogramme comparatif des masses volumiques des composites étudiés

Les résultats présentés sur la figure 31 ont montré que plus le volume du renfort en fibres (Alfa, Diss) augmente plus la masse volumique du bio-composite diminue. Il est aussi clairement montré que la masse volumique des composites renforcés de fibres non traitées est plus faible que celle des bio-composites renforcés par les fibres naturelles traitées (bouillies).

Cette diminution apparente de la masse volumique des bio-composites comparé à celle du béton cimentaire (2500 kg/m³) est essentiellement dû au grand écart entre la masse volumique entre les fibres et le ciment, cette diminution est proportionnelle à la quantité de fibres ajoutées, plus il y a de fibres, plus cette diminution est importante. Aussi pour la masse volumique des bio-composites renforcés par des fibres traitées est plus grande que celle renforcées par des fibres non traitées, ceci est probablement dû à la quantité de sucres que contiennent ces fibres naturelles qui s'égoutte aussi quand elle se dissout dans l'eau de gâchage.

III.1.3. Détermination du retrait et de la perte de masse des différents bio-composites cimentaires élaborés

Les fissures provoquées par l'hydratation du ciment qui apparaissent sur les composites cimentaires fibrés au cours du séchage présentent un handicap major, qui diminue la résistance et limite la longévité du composite bio-fibré. Pour remédier à cette pathologie engendrée par ces fissures, nous avons mené une étude de l'évolution du retrait causé par le séchage sur des composites cimentaires fibrés et ce sur une période de cinq mois dans le laboratoire de génie civil. Les essais de retrait appliqués sur les bio-composites élaborés sont réalisées comme il est décrit sur la norme NF P15-433.

Les essais de retrait ainsi que celle de la perte de masse ont été réalisés durant 149 jours.

III.1.4. Résultats de la perte de masse des bio-composites cimentaires élaborés

Les résultats des essais de la perte de masse lors du séchage des bio composites cimentaires renforcés par les fibres d'Alfa et les fibres de Diss sont représentés sous forme de courbes sur les figures 32 et 33.

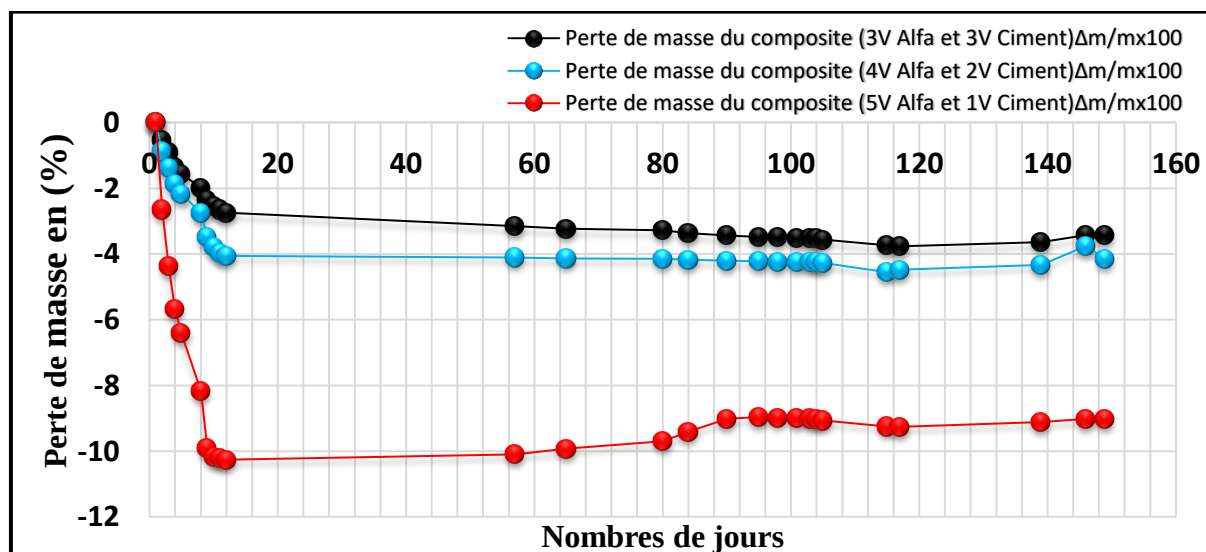


Figure 32: Courbe des variations de la masse des bio-composites cimentaires renforcés par des différents volumes des fibres d'Alfa

D'après les courbes présentées sur la figure 32 nous avons constaté que les échantillons des trois formulations de composites ont eu une chute de poids rapide durant douze jours à compter du jour de démoulage. Cette perte s'est stabilisée presque après le douzième jour à un taux de l'ordre entre 2,8 à 3,6 % pour la première variante présentée sur la courbe jaune (3VAlfa et 3Vciment), la deuxième variante présentée sur la courbe bleue (4VAlfa et 2Vciment) s'est

stabilisée à un taux de l'ordre entre 4 et 4,4%, tandis que la troisième variante présentée sur la courbe rouge (5VAlfa et 1Vciment), la perte de masse a été de l'ordre de 10,4%.

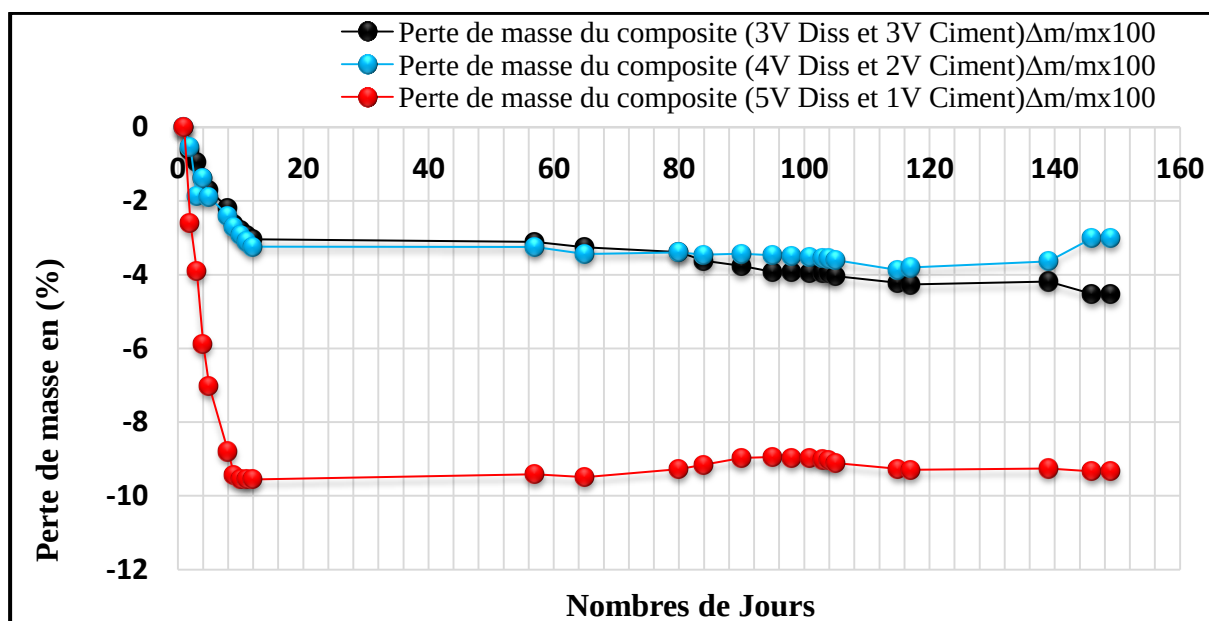


Figure 33: Courbe des variations de la masse des bio-composites cimentaires renforcés par des différents volumes des fibres de Diss

D'après les courbes présentées sur la figure 33 nous avons constaté que les échantillons des trois formulations de composites ont eu une chute de poids rapide durant douze jours à compter du jour de démoulage. Cette perte s'est stabilisée presque après le douzième jour à un taux de l'ordre entre 3 et 4,6% pour la première variante présenté sur la courbe jaune (3VDiss et 3Vciment), pour la deuxième variante présentée sur la courbe bleue (4VDiss et 2Vciment) s'est stabilisée à un taux de l'ordre de 3,2% tandis que la troisième variante présentée sur la courbe rouge (5VDiss et 1Vciment), la perte de masse a été de l'ordre de 9,6%.

Des précédentes constatations, la perte de masse des composites cimentaires fibrés est généralement expliquée par la déperdition de l'eau pendant la cure et le séchage (vaporisation et égouttage) des eaux absorbées (taux d'absorption des fibres naturelles très élevé qui dépasse 100%) et de l'eau ajoutée pendant le gâchage à cause de la porosité substantielle que possèdent les fibres naturelles (Alfa et Diss).

Des histogrammes comparatifs présentés sur les figures 32 et 33 ont pour objectifs de montrer la relation entre le taux de perte de masse et le taux d'ajout des fibres naturelles dans les composites bio-fibrés.

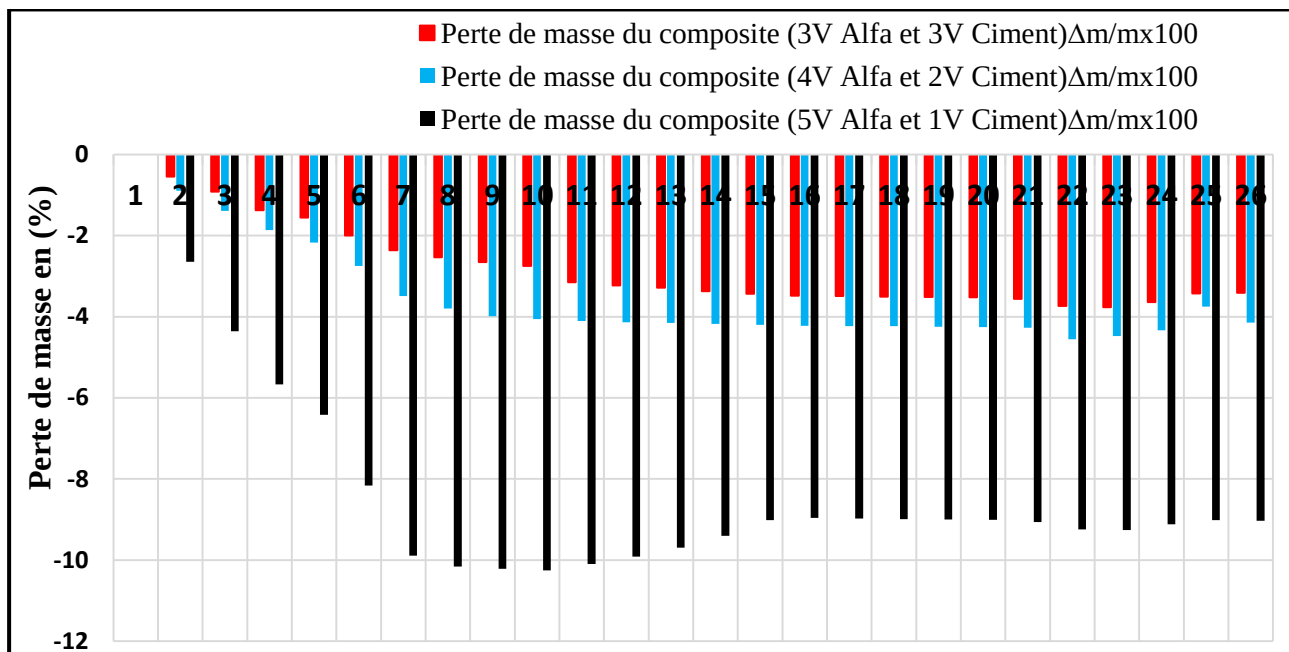


Figure 34: Histogramme comparatif des variations de la masse des bio-composites cimentaires renforcés par des différents volumes des fibres d'Alfa

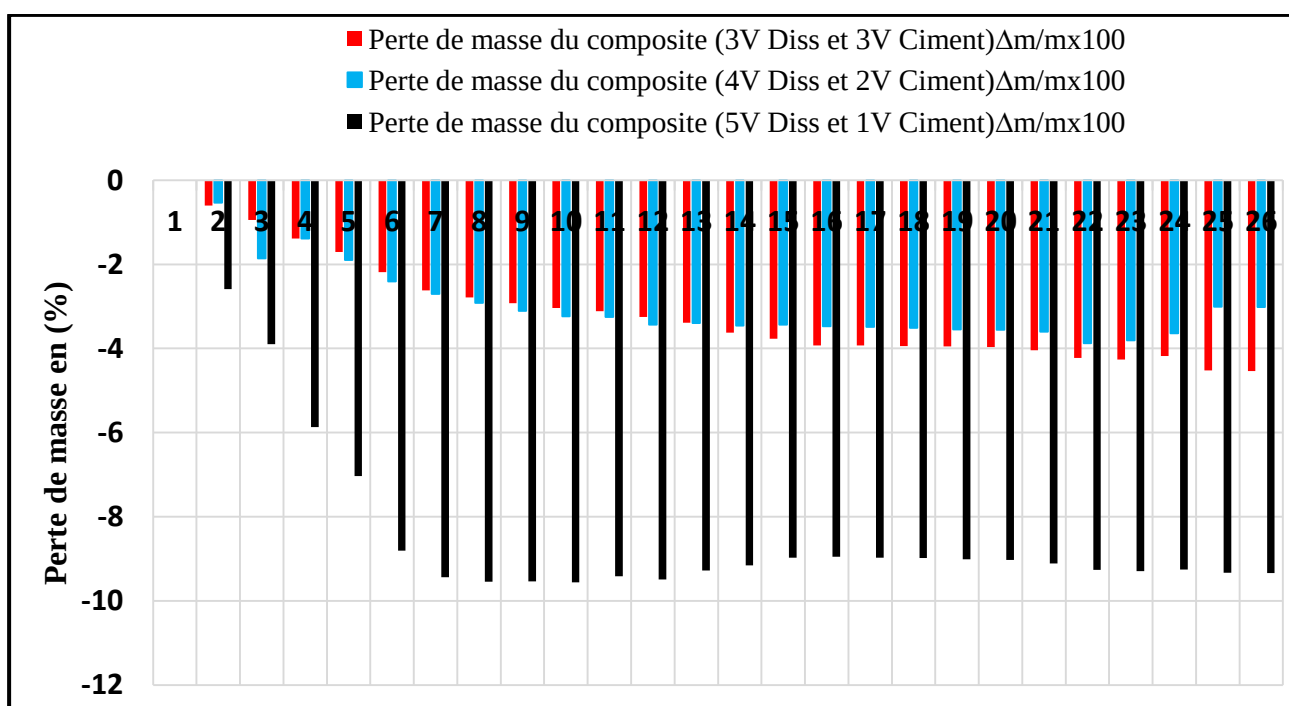


Figure 35: Histogramme comparatif des variations de la masse des bio-composites cimentaires renforcés par des différents volumes des fibres de Diss

À travers les deux histogrammes présentés sur les figures 34 et 35 nous constatons que la perte de masse évolue dans le temps et que cette perte est relative au taux de renfort en fibres naturelles ajoutées.

Cet écart de perte de masse illustré sur les deux histogrammes des figures 34 et 35 justifient le taux d'absorption d'eau de gâchage, qui est proportionnel à la quantité de fibres rajoutées.

III.1.5. Résultats du retrait des différents bio-composites cimentaires élaborés

Les variations des valeurs du retrait de séchage durant près de trois mois des bio-composites cimentaires renforcés par les fibres d'Alfa et ceux renforcés par les fibres de Diss sont données par les figures 36 et 37.

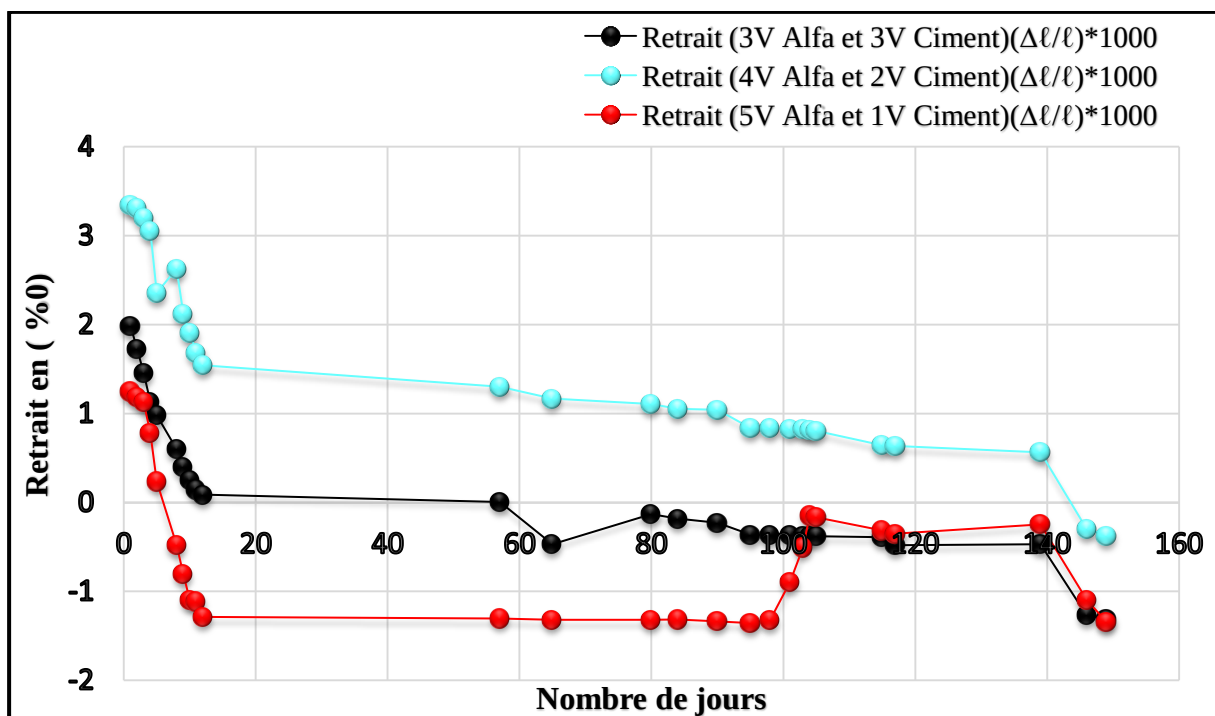


Figure 36: Courbes de retrait des bio-composites cimentaires renforcés par des différents volumes des fibres d'Alfa

Comme il est présenté par les trois courbes sur la figure 36; il a été constaté un retrait qui a progressé avec une cadence élevée qui a commencé du premier jour de démoulage jusqu'au douzième jour d'un taux de l'ordre de 2‰ pour la formulation présentée sur la courbe jaune (3VAlfa et 3Vciment) et la deuxième formulation présentée sur la courbe bleue (4VAlfa et 2Vciment). Cette progression élevée été d'un taux de l'ordre de 2,5‰ pour la troisième formulation présentée sur la courbe rouge (5VDiss et 1Vciment).

Cette progression rapide de retrait devient lente après le douzième jour jusqu'au dernier jour de cet essai (149^{ème} jours). Le retrait relatif à la première formulation a progressé après le douzième jour d'un taux de l'ordre de 4‰, la deuxième a progressé d'un taux de l'ordre de 3,4‰, tandis que pour la troisième formulation, le retrait s'est stabilisé au même taux (2,5‰).

En général les taux de retrait sont très minimes, qui n'ont pas d'influence négative sur la résistance des bio-composites.

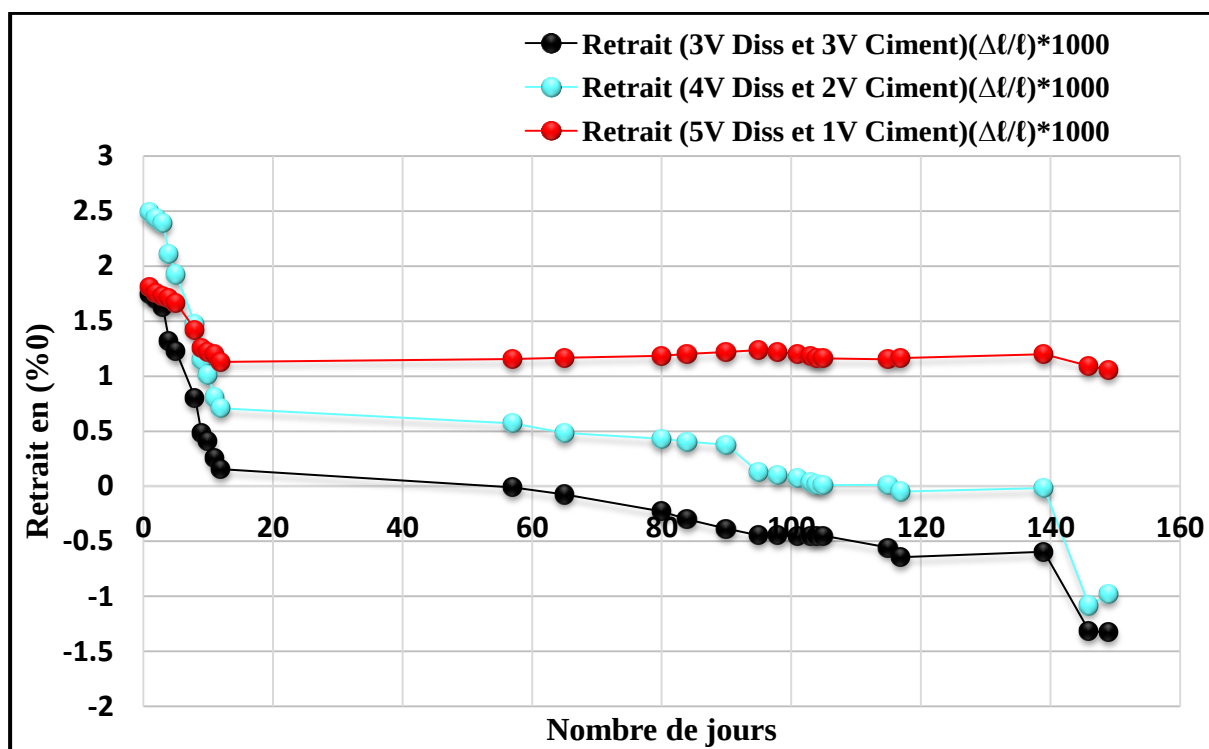


Figure 37: Courbes de retrait des bio-composites cimentaires renforcés par des différents volumes des fibres de Diss

Le taux de retrait des trois variantes présentées sur la figure 37 s'est progressé rapidement dès le premier jour après démoulage jusqu'au douzième jour d'un taux de l'ordre de 1,8‰ pour la première et la deuxième formulation et de 0,8‰ pour la troisième formulation.

Après le douzième jour et jusqu'au 149^{ème} jours le retrait continue de s'élever mais avec une cadence lente jusqu'au taux d'un ordre de 3,4‰, pour la première et la deuxième formulation et garde le même taux pour la troisième formulation (0,8‰).

Ces variations de retrait sont insignifiantes, et n'influencent pas sur la résistance des bio-composites.

D'après les figures 32, 33, 36 et 37, il est clairement montré à travers les courbes que la cadence de la variation de la perte de masse de l'Alfa et de Diss en fonction du temps est presque similaire que la cadence de la variation du retrait des deux types de composites à différentes fibres.

III.1.6. Résultats des essais mécaniques sur les bio-composites cimentaires des fibres bouillis pour différentes formulations

Les résultats des essais mécaniques sur les bio-composites à base de fibres d'Alfa et de Diss traités et non traités sont représentés sur les figures 38 et 39.

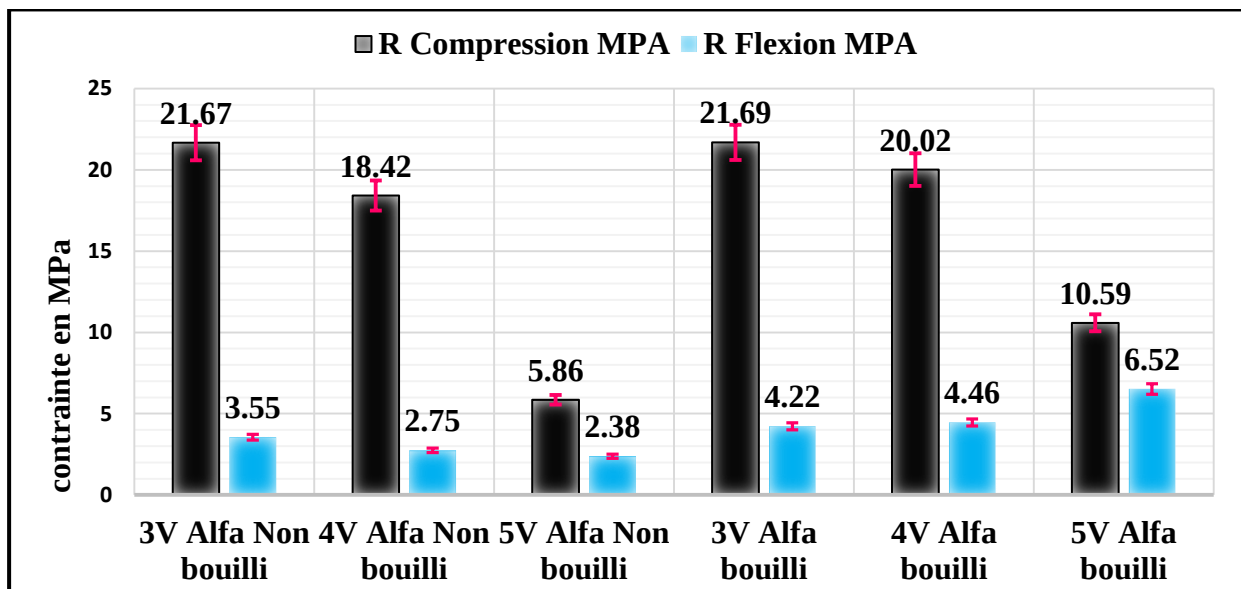


Figure 38: Résistance à la flexion et à la compression des bio-composites fibrés à base d'Alfa

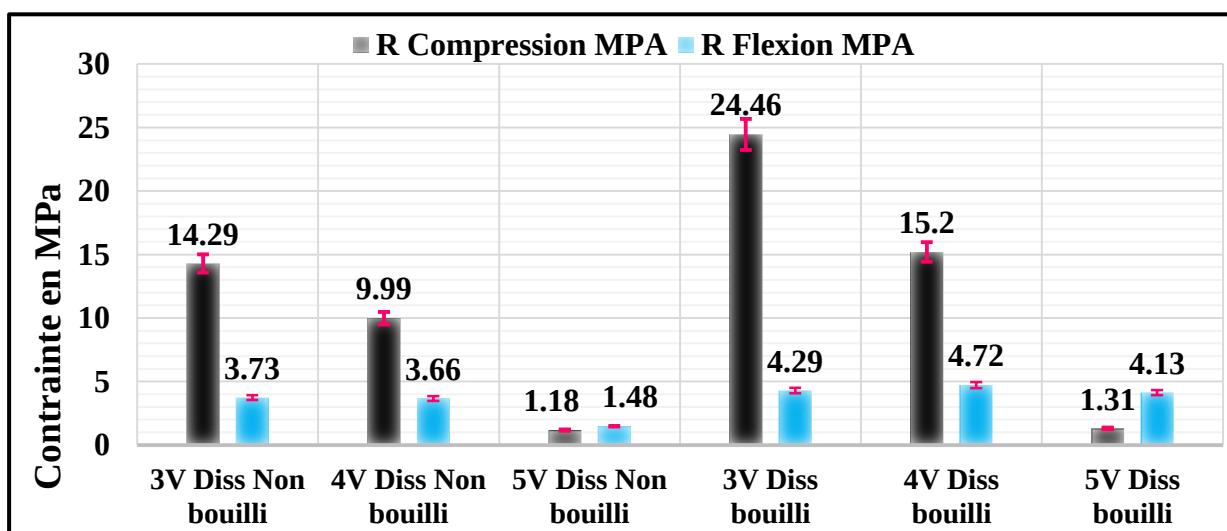


Figure 39: Résistance à la flexion et à la compression des bio-composites fibrés à base de Diss

Les résultats des figures 38 et 39 montrent bien l'influence de l'ébullition des fibres sur les caractéristiques mécaniques des bio-composites, où on constate une augmentation des résistances à la flexion et à la compression après diminution du taux de sucres et des composés hydrosolubles causes du retard de prise et perte de résistance.

D'après les résultats des essais mécaniques présentés sur les figures 38 et 39, nous avons constaté que la meilleure formulation du composite à base de fibres d'Alfa et e Diss bouilli qui présentent les meilleures résistances à la compression est celle qui correspond au rapport 3:3 volumes c.à.d. celui de trois volumes de fibres contre trois volumes de ciment. Tandis que pour les échantillons qui seront sollicités à la flexion est celle du rapport 5: 1 pour les composites à base d'Alfa bouilli et 4 : 2 pour les composites à base de Diss bouilli

Néanmoins la formulation optimale pour les deux types de sollicitations (flexion, compression) est celle du rapport 4:2 volumes c.à.d. celle de quatre volumes de fibres avec deux volumes de ciment, cette formulation sera adoptée pour le reste des essais.

III.1.7. Imageries en MEB des bio-composites cimentaires des fibres bouillies

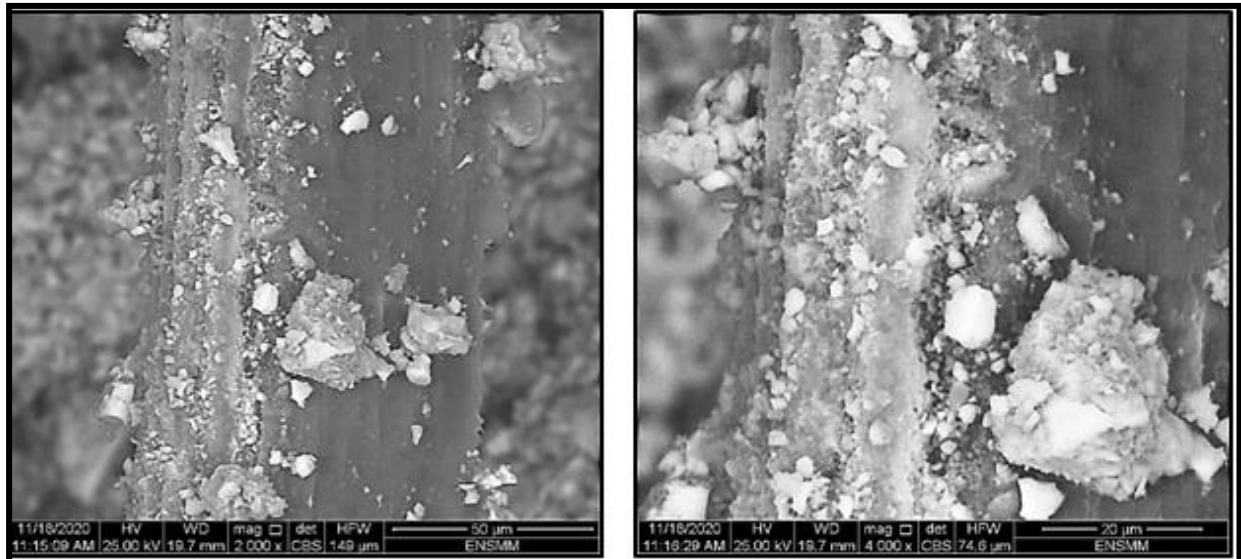


Figure 40: Images au MEB de la surface de contact d'une fibre de composite d'Alfa naturel broyé /ciment, agrandissement x 2000/4000.

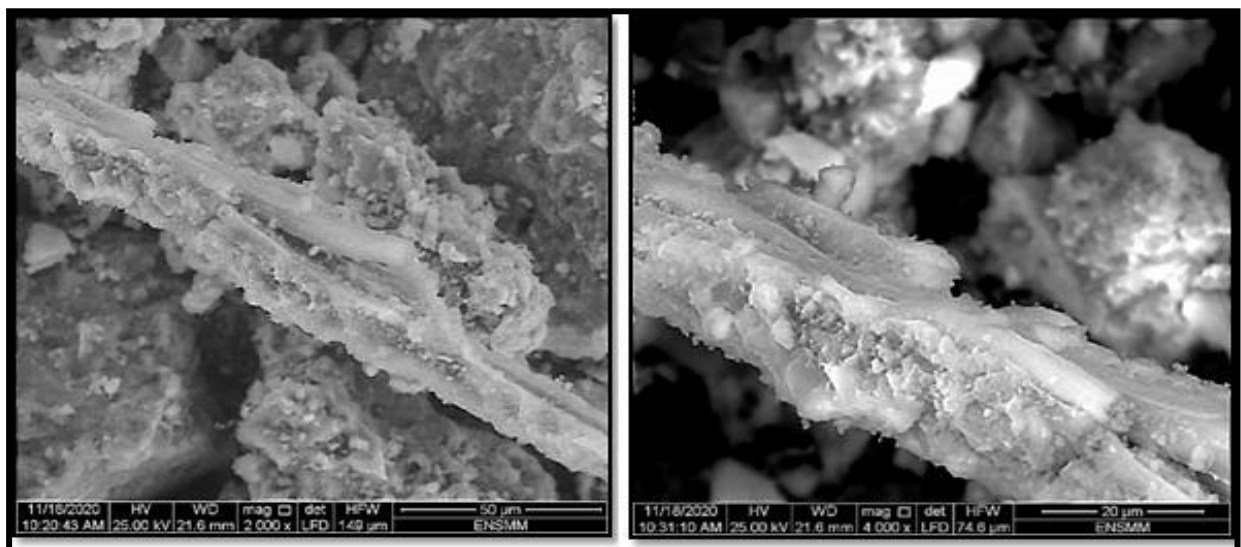


Figure 41: Images au MEB de la surface de contact d'une fibre de composite d'Alfa bouilli /ciment, agrandissement x 2000/4000.

D'après l'image au MEB de la figure 41, présentant des fragments de ciment éparpillés sur la surface de contact, montrant la mauvaise adhérence sur les parois des fibres d'Alfa broyé,

car le décollement de ciment s'est effectué au niveau de la surface directe du contact ciment/fibre.

D'après l'image de la figure 42, présentant une surface très rugueuse des fragments de ciment sur la surface de contact, montrant la bonne adhérence sur les parois des fibres d'alfa broyées et bouillies, car la rupture s'est effectuée au niveau du ciment est non pas au niveau de la surface directe du contacte ciment/fibre.

Les résultats des essais mécaniques appliqués sur les échantillons de la pâte pure de ciment pur, où la résistance à la compression est de 34,08 MPa c'est une valeur plus élevée que celle de tous les bio-composites étudiés, tandis que c'est l'inverse pour la résistance à la flexion qui est de l'ordre de 2,30 MPa. Mais dans tous les cas les bio-composites fibrés présentent des comportements ductiles aussi bien en flexion qu'en compression, alors les essais sur la pâte pure présentent un comportement fragile.

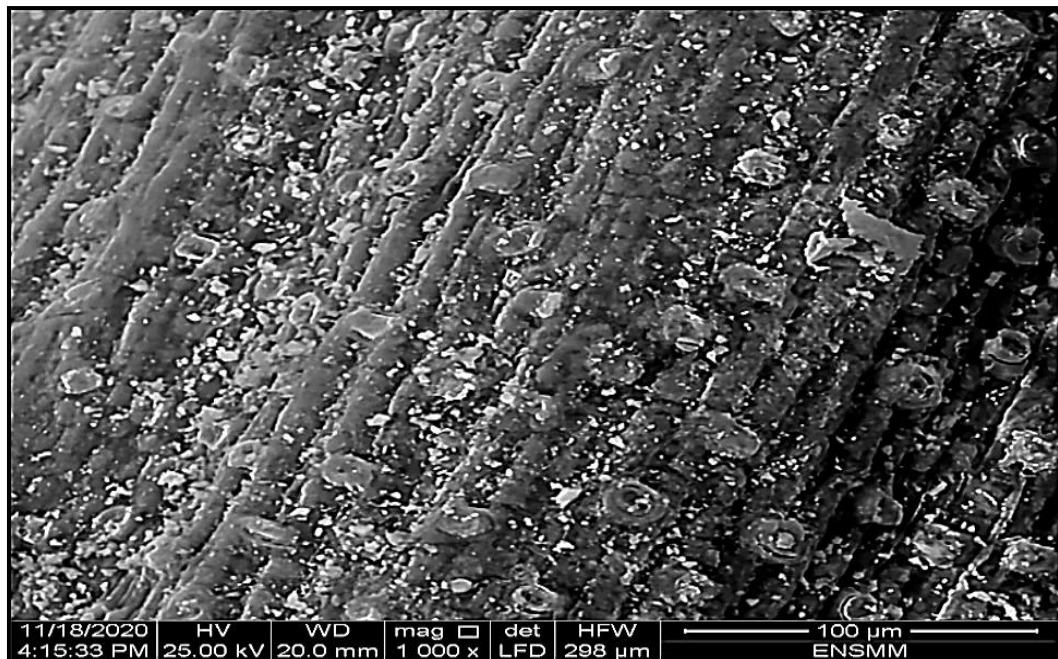


Figure 42: Images au MEB de la surface de contact d'une fibre de composite de Diss naturel broyé/ciment, agrandissement x 1000

D'après l'image au MEB de la figure 42, présentant des fragments de ciment éparpillés sur la surface de contact, montrant la mauvaise adhérence sur les parois des fibres de Diss broyées, car le décollement de ciment s'est effectué au niveau de la surface directe de contacte ciment/fibre.

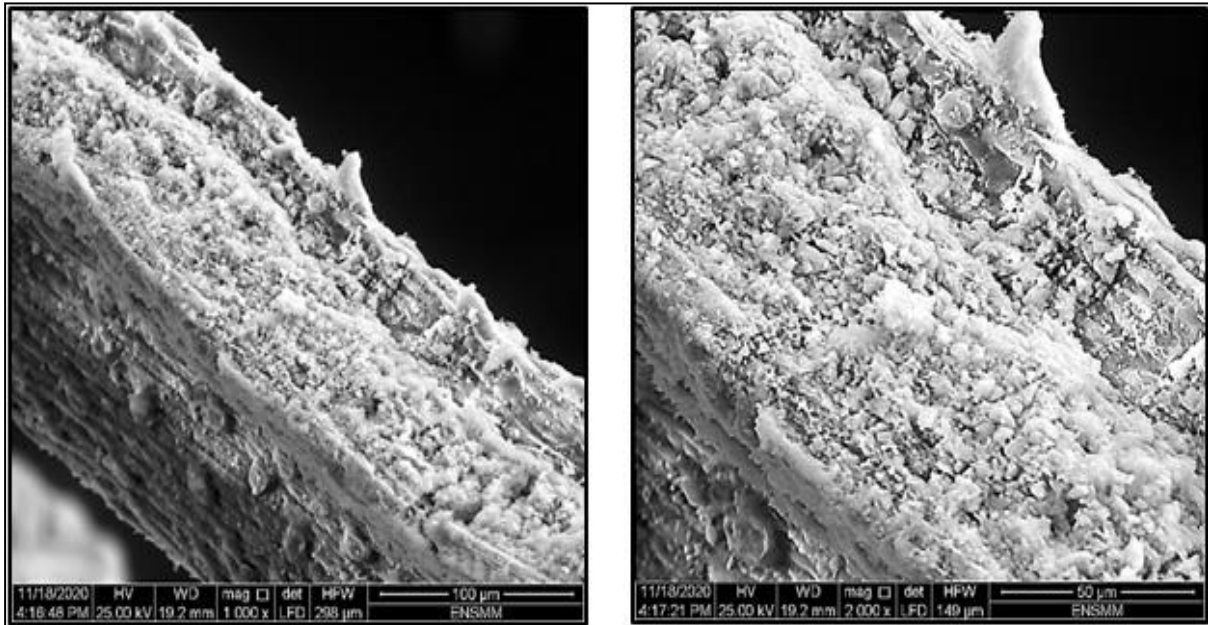


Figure 43: Images au MEB de la surface de contact d'une fibre de composite de Diss bouilli /ciment, agrandissement x 1000/2000

Les images au MEB de la figure 43, présentent une surface très rugueuse des fragments de ciment sur la surface de contact, et montrent la bonne adhérence sur les parois des fibres de Diss broyées et bouillies, car la rupture s'est effectuée au niveau du ciment et non pas au niveau de la surface directe de contact ciment/fibre.

III.1.8. Résultats des essais mécaniques sur les bio-composites cimentaires à base de fibres immergées dans l'eau de mer à des différents âges

En plus du traitement des fibres par ébullition, qui a pu améliorer les caractéristiques mécaniques des bio-composites de fibres d'Alfa et de Diss traitées à l'eau bouillie, nous avons également procédé à un traitement par immersion des fibres d'Alfa et de Diss dans l'eau de mer à différents âges.

III.1.9. Résistances à la flexion

Les résultats des résistances à la flexion des bio-composites à base de fibres d'Alfa et de Diss immergées à l'eau de mer, à différents âges sont représentés sur la figure 44.

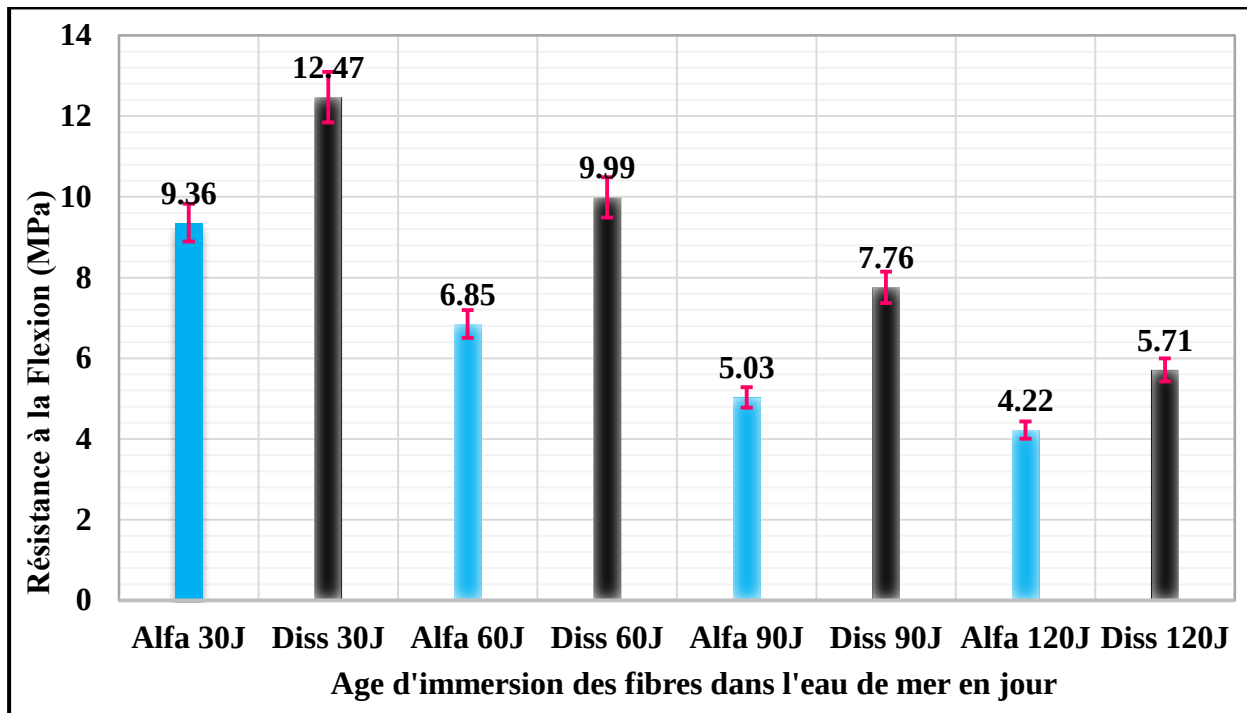


Figure 44: Résistances à la flexion des bio-composites à base de fibres immergés dans l'eau de mer.

Les courbes contrainte-déformation obtenues lors des essais de flexion des bio-composites renforcés par des fibres de Diss et d'Alfa, après une immersion de 30 jours dans l'eau de mer, sont présentées, respectivement, sur les Figures 45 et 46 pour trois éprouvettes.

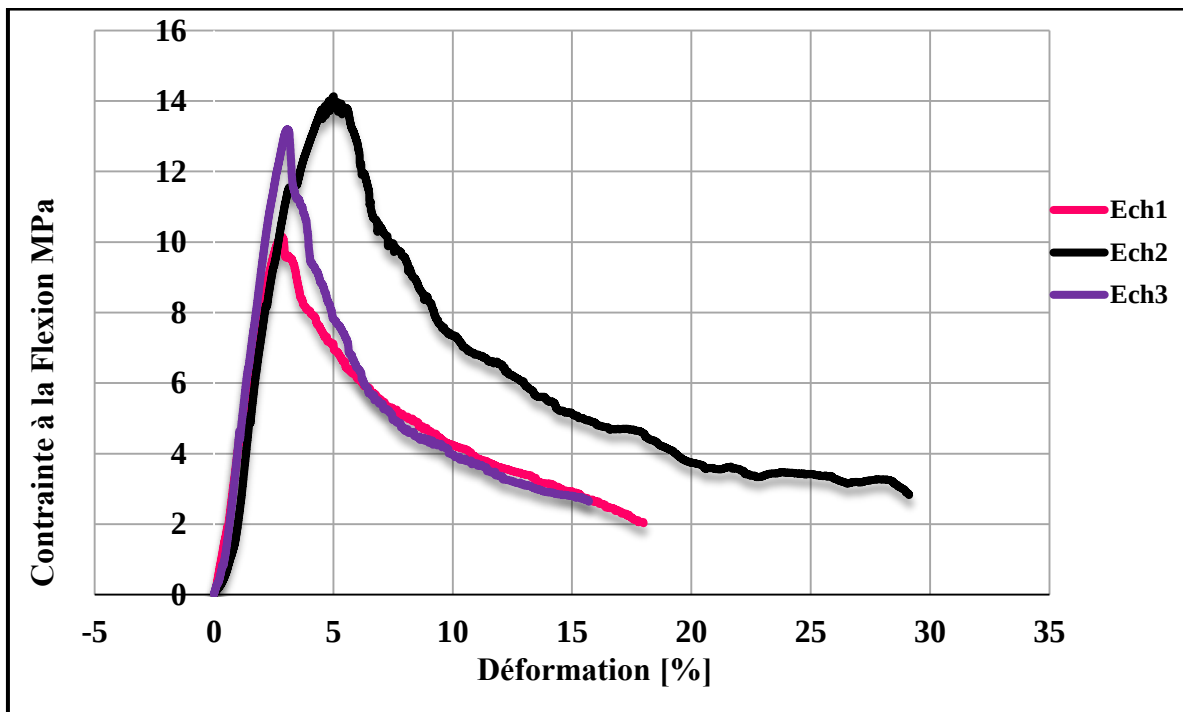


Figure 45: Courbes contrainte à la flexion des bio-bio-composites à base de fibres de Diss immergés dans l'eau de mer pendant 30 jours

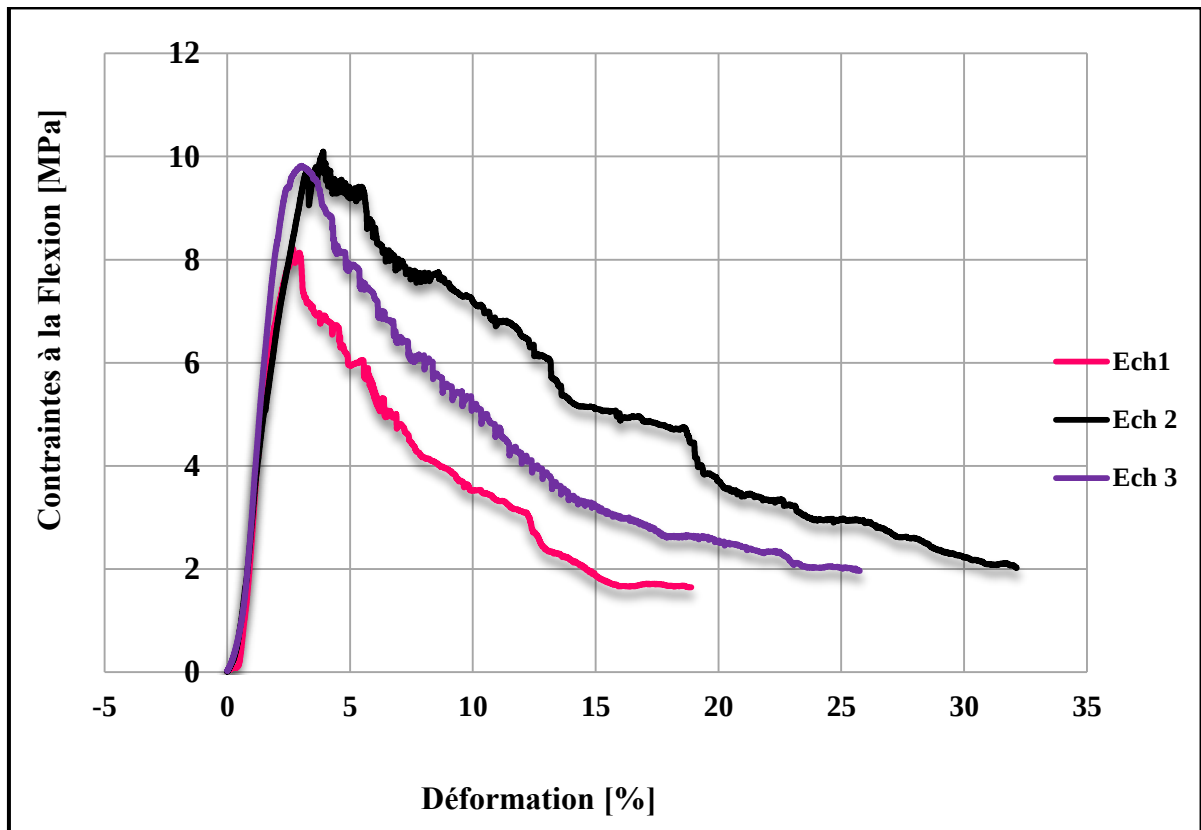


Figure 46: Courbes contrainte à la flexion des bio-composites à base de fibres d'Alfa immergés dans l'eau de mer pendant 30 jours

D'après les résultats des essais de flexion appliqués sur les échantillons immergés dans l'eau de mer, nous avons constaté que :

- La résistance à la flexion des bio-composites renforcés par les fibres de Diss immergés dans l'eau de mer est supérieure que celle des bio-composites renforcés par les fibres d'alfa.
- La résistance à la flexion des bio-composites immergés dans l'eau de mer a atteint la valeur maximale à l'âge de 30 jours d'immersion et au-delà de cet âge, elle diminue, mais en gardant des valeurs plus importantes que celle obtenues par traitement par ébullition.

III.1.10. Résistances à la compression

Les résultats des résistances à la compression des bio-composites à base de fibres immergées à l'eau de mer, à différents âges sont représentés sur la figure 47.

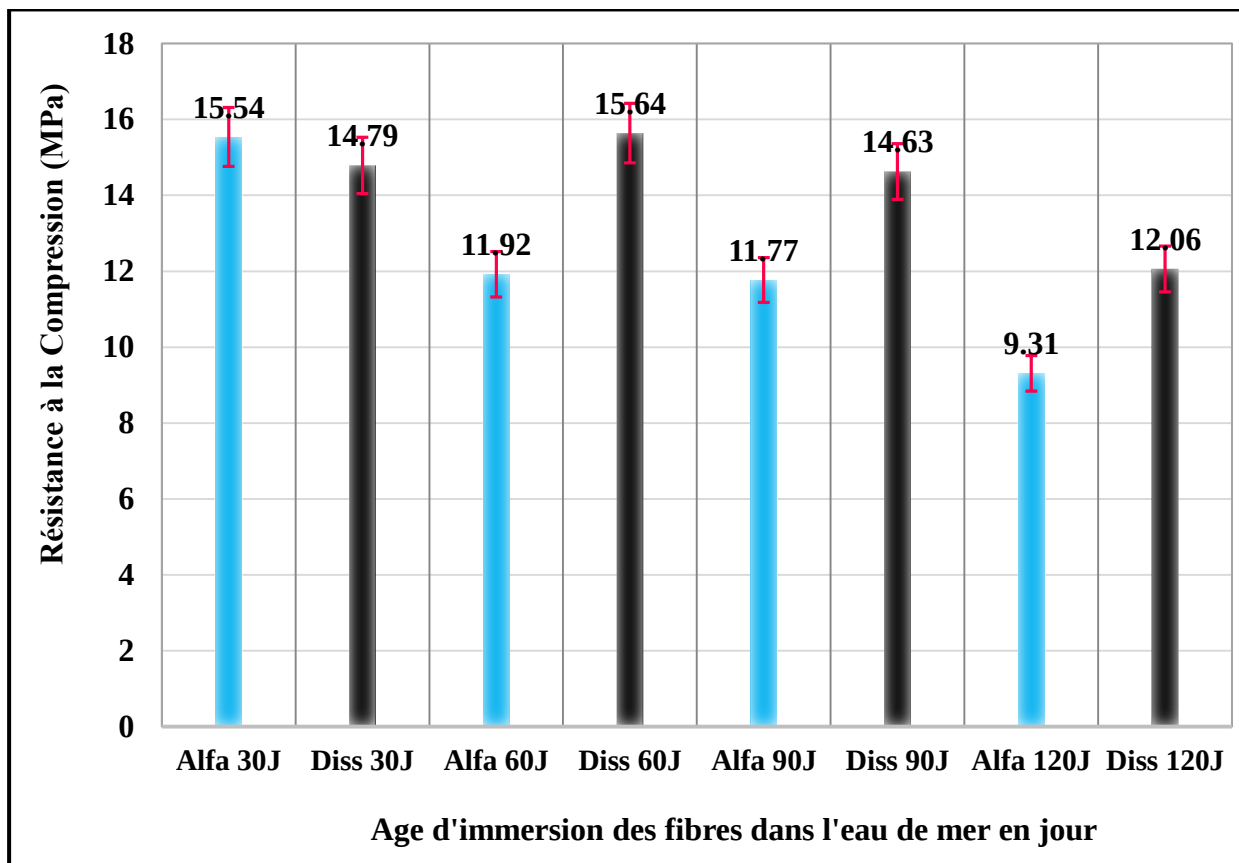


Figure 47: Résistances à la compression des bio-composites à base de fibres immergées dans l'eau de mer

Les résultats des essais à la compression appliqués sur les échantillons immergés dans l'eau de mer, ont montré que :

- Les résistances à la compression des bio-composites renforcés par les fibres de Diss immergées dans l'eau de mer sont plus élevées que celles des bio-composites renforcés par les fibres d'alfa.
- La résistance à la compression des bio-composites renforcés par les fibres d'Alfa immergées dans l'eau de mer a atteint la valeur la plus grande à l'âge de 30 jours d'immersion, et elle diminue au-delà de cet âge, et pour les bio-composites renforcés par des fibres de Diss la meilleure résistance est atteinte à l'âge de 30 jours d'immersion, et elle diminue au-delà de l'âge de 60 jours d'immersion. Cette diminution affirme que c'est dû à « la biodégradation ou la bio-détérioration de la fibre causée par la combinaison des trois paramètres, le matériau (fibres naturelles), les micro-organismes (les bactéries, les champignons et les microalgues) et le milieu défavorable (eau de mer) » (Rabii, 2016).

**III.1.11. Imageries en MEB des bio-composites cimentaires des fibres
immergées dans l'eau de mer**

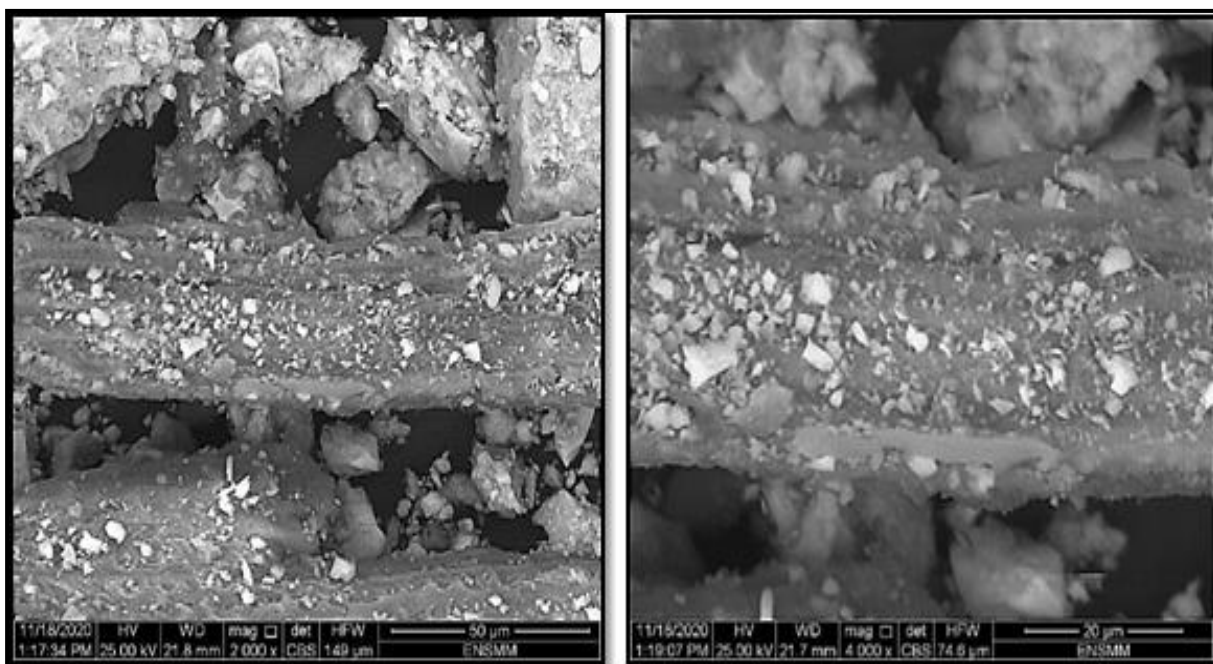


*Figure 48: Images au MEB de la surface de contact d'une fibre de composite d'Alfa
immergée en eau de mer 30J/ciment, agrandissement x 2000/4000*

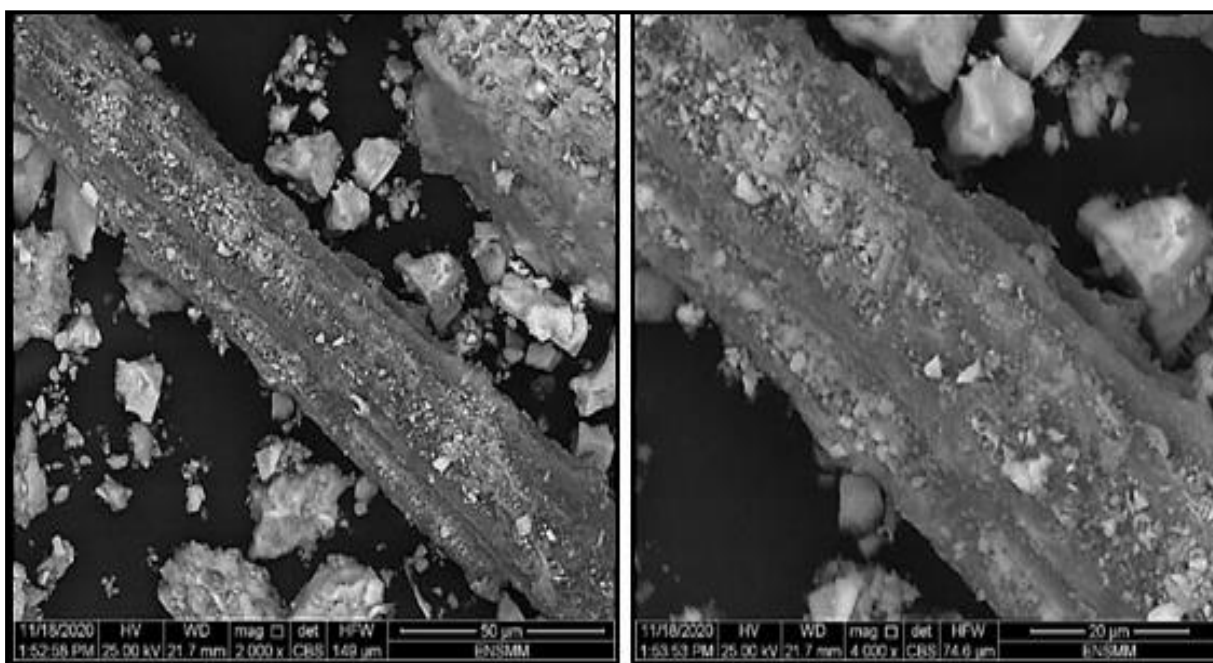


*Figure 49: Images au MEB de la surface de contact d'une fibre de composite d'Alfa
immergée en eau de mer 60J/ciment, agrandissement x 2000/4000*

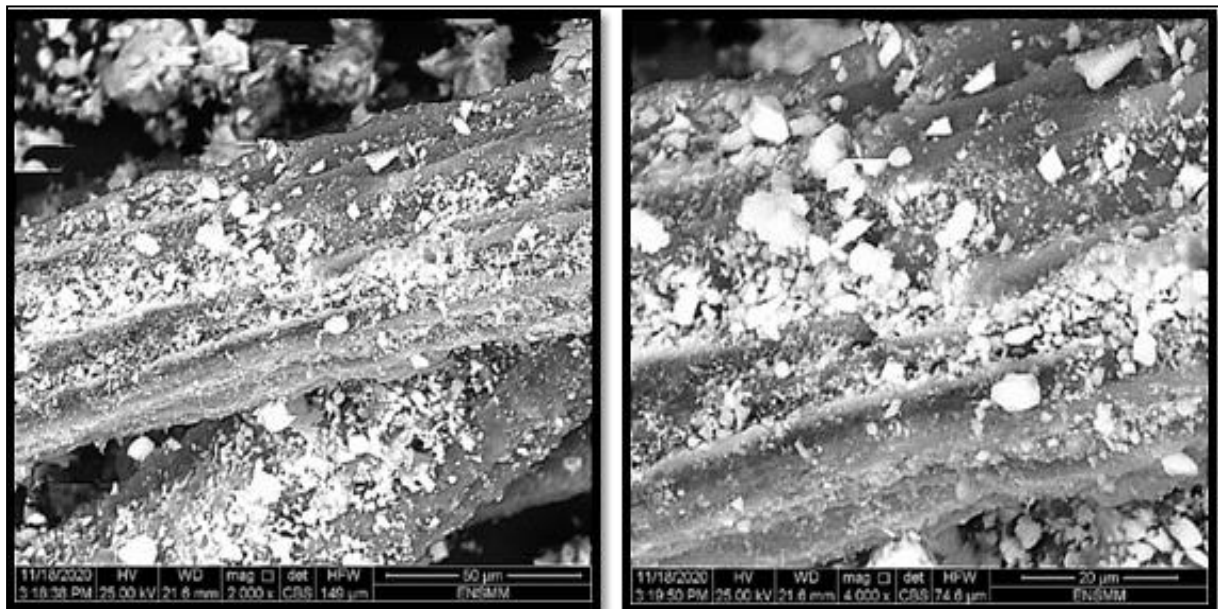


Figure 50: Images au MEB de la surface de contact d'une fibre de composite d'Alfa immergée en eau de mer 90J/ciment, agrandissement x 2000/4000

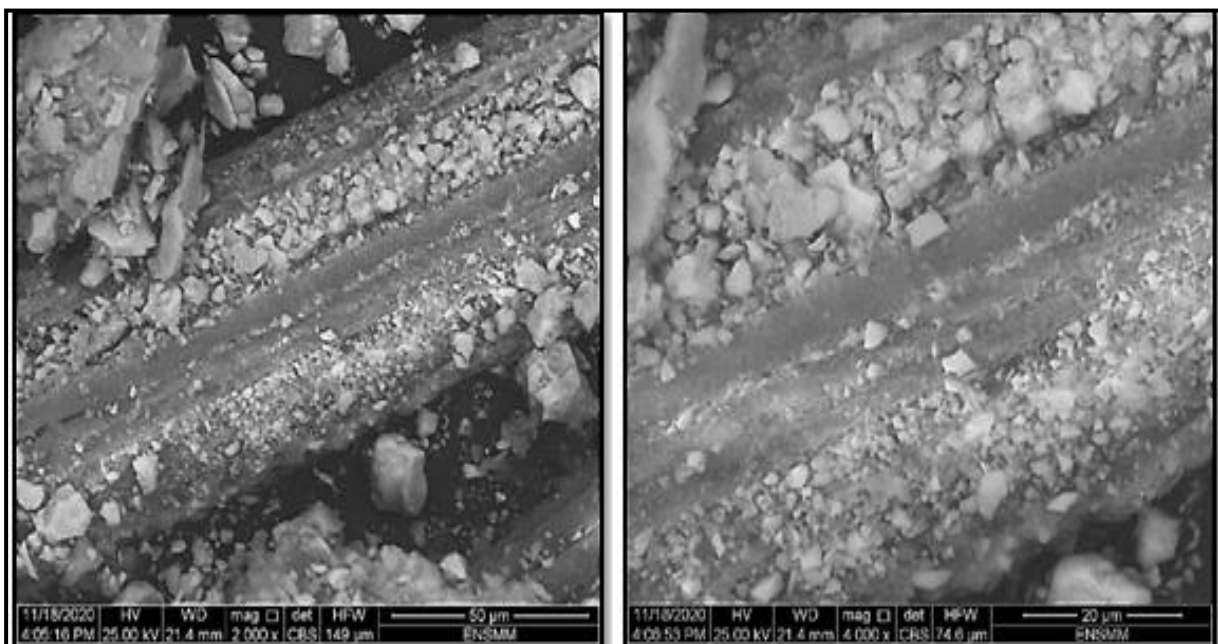


Figure 51: Images au MEB de la surface de contact d'une fibre de composite d'Alfa immergée en eau de mer 120J/ciment, agrandissement x 2000/4000

D'après les images représentées sur les figures 48 à 51, la quantité des fragments de ciment sur la surface de rupture est en relation directe avec le nombre de jours d'immersion des fibres dans l'eau de mer. On constate également une bonne adhésion des fibres d'Alfa à la pâte de ciment due à la perte progressive des sucres contenues dans les fibres, et que la présence du

sel au-delà de 30 jours dans les bio-composites détériorent certainement certains composants responsables de leur rigidité.

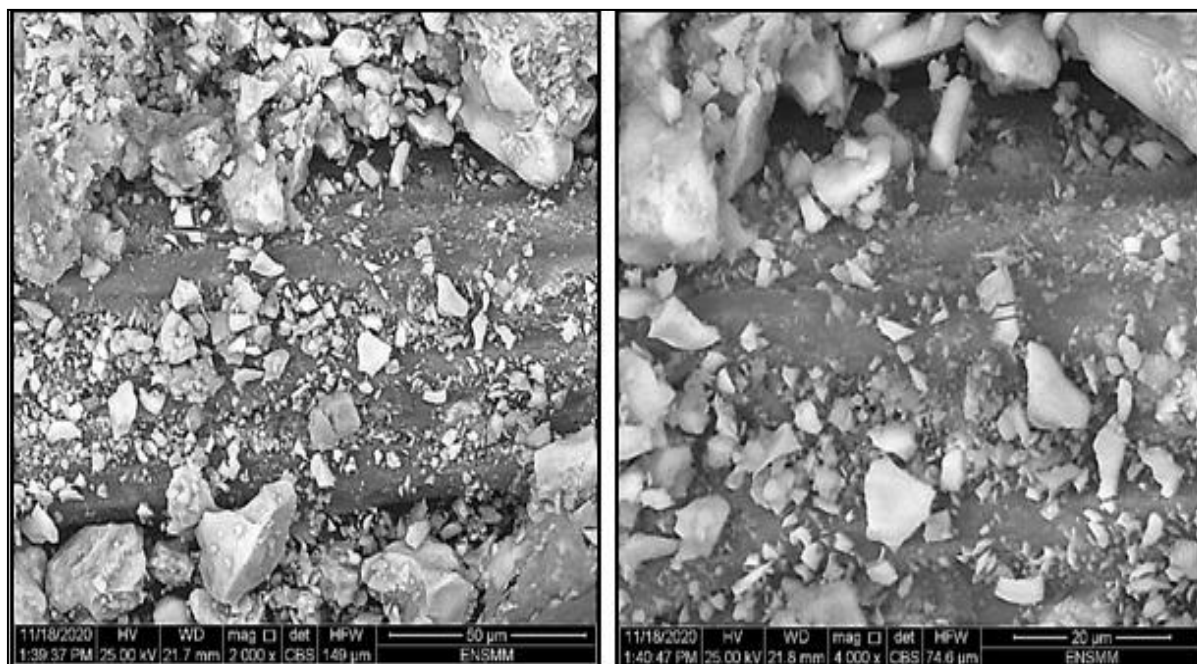


Figure 52: Images au MEB de la surface de contact d'une fibre de composite Diss immergée en eau de mer 30J/ciment, agrandissement x 2000/4000

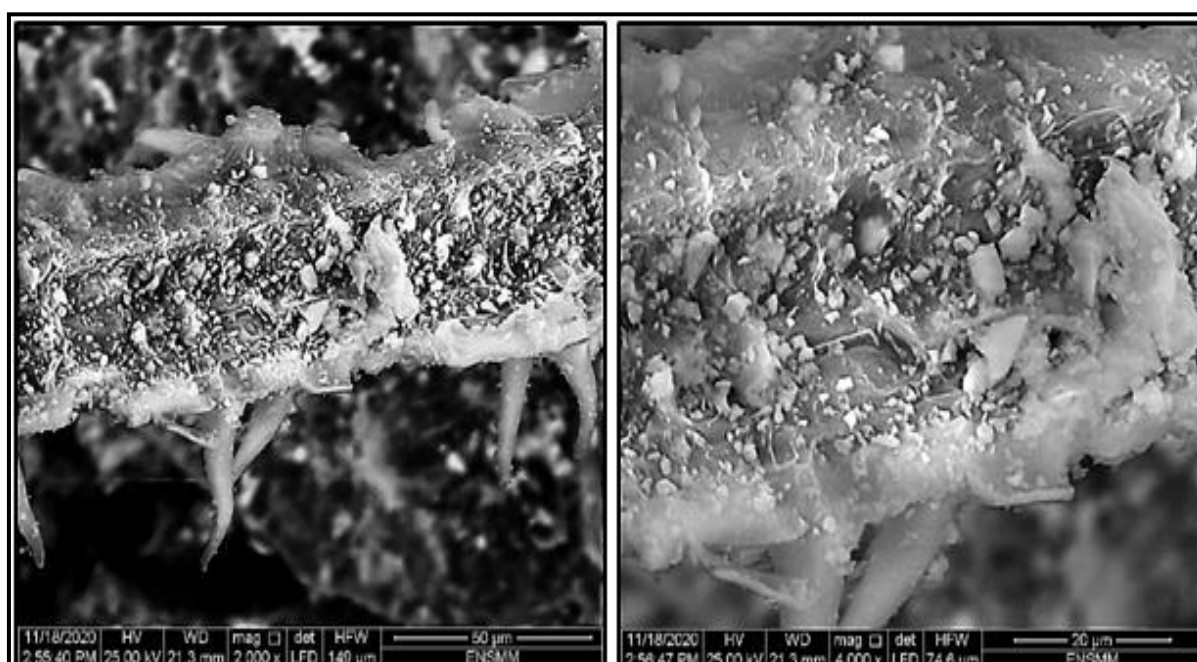


Figure 53: Images au MEB de la surface de contact d'une fibre de composite Diss immergée en eau de mer 60J/ciment, agrandissement x 2000/4000

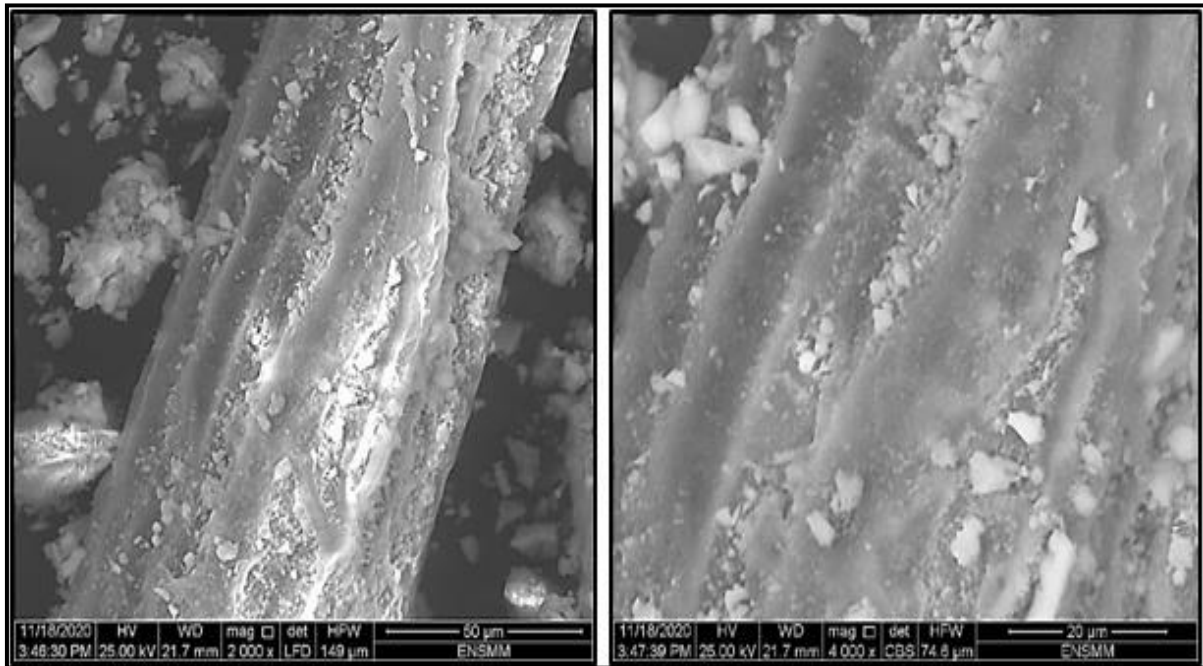


Figure 54: Images au MEB de la surface de contact d'une fibre de composite Diss immergée en eau de mer 90J/ciment, agrandissement x 2000/4000

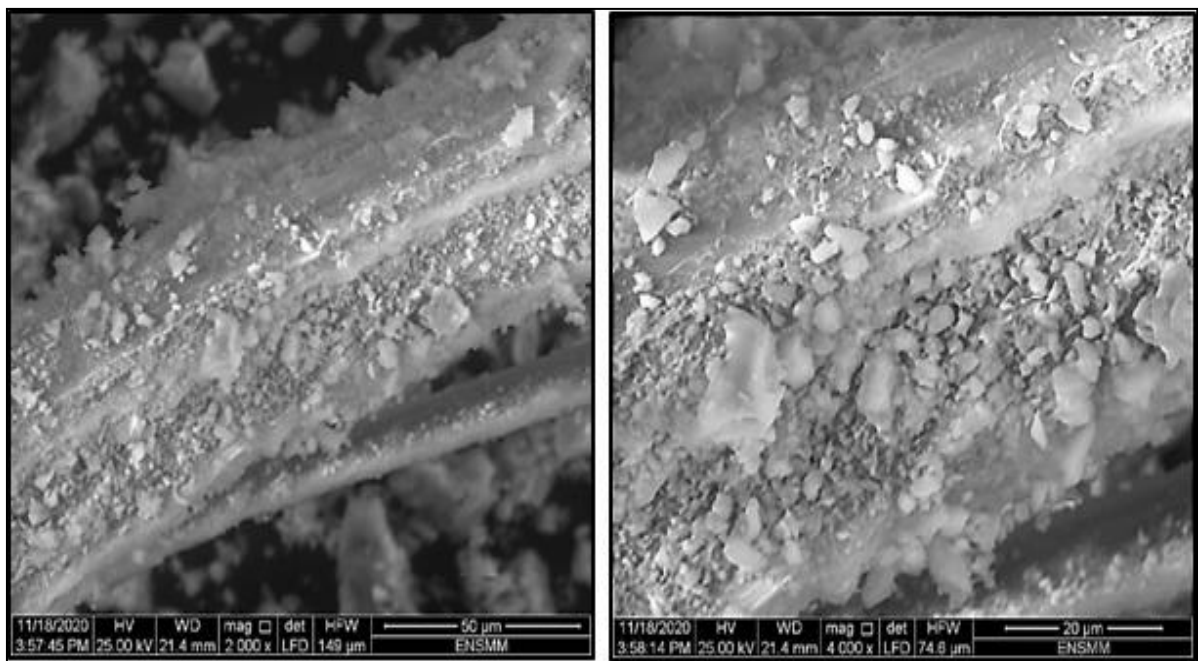


Figure 55: Images au MEB de la surface de contact d'une fibre de composite Diss immerger en eau de mer 120J/ciment, agrandissement x 2000/4000

D'après les images présentées sur les figures 52 à 55, la quantité des fragments de ciment sur la surface de rupture est en relation directe avec le nombre de jours d'immersion des fibres dans l'eau de mer. On constate également une bonne adhésion des fibres de Diss à la pâte de ciment due à la perte progressive des sucres contenues dans les fibres, et que la présence du sel au-delà de 30 jours dans les bio-composites détériorent certainement certains composants

responsables de leur rigidité, mais pas autant que les bio-composites cimentaires à base de fibres d'Alfa.

Les résultats des essais de dosage des sucres totaux suscités ainsi que les images du MEB prises sur la surface d'une fibre après la rupture des éprouvettes confirme, que non seulement la structure épineuse des fibres est responsable de l'adhérence fibres/ciment, mais aussi à cause des pertes de sucre obtenues soit par le traitement thermique des fibres ou par leur immersion dans l'eau de mer.

III.1.12. Récapitulatif des résultats des essais mécaniques appliqués sur des bio-composites cimentaires bio-fibrés dont les fibres sont soumises à des différents traitements

L'intérêt le plus pertinent par l'intégration des bio-fibres vertes pour l'élaboration des bio-composites cimentaires certainement est d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques voire l'augmentation de la résistance à la flexion. Bien évidemment tout cela fait forcément partie du cadre de respect de l'environnement (réduire la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre, ..., etc.), ainsi que la bonne gestion des déchets et ce par le choix adéquat des traitements appliqués sur ces bio-renforts.

Les résultats entiers obtenus par les essais de résistances à la flexion appliqués sur des bio-composites cimentaires renforcés par de bio-fibres vertes, sont influencés par plusieurs variables notamment le taux et la forme du renfort ajouté à la matrice (taux de fibres découpées en brins ou broyées, ..., etc.). Egalement pour les traitements appliquer sur cette substance naturelle (raffinés : Bagasse, Blé, Eucalyptus (Morteza, 2011); Chimiques physiques contribuant à la dissolution des matières lignocellulosiques : Jute (Menadi,2013); Huile de lin; Hygrothermique (bouilli); Bouilli Pré-mouillé: Diss (Fertikh, 2013), ...etc.

Dans le but de cibler les procédés de traitements les plus fiables et les proportions (quantités de fibres, de matrice, d'eau...etc.) choisis pour l'obtention des formulations adéquates pour améliorer les caractéristiques mécaniques des composites élaborées dans cette étude. En dépit de cette diversité de variables, il est indispensable de mettre en réseau les résultats de ce travail avec ceux des travaux de recherches antécédents et similaires, (résistances en flexion varient entre 2,1 à 6 MPa d'après les référentiels cités dans ce manuscrit). Il est remarquable que ces résultats sont plus ou moins faibles que ceux approuvés dans ce travail, le tableau 24, qui regroupe les meilleurs résultats des essais de résistances à la flexion appliqués sur les bio-composites cimentaires renforcés par de bio-fibres vertes.

Tableau 24: récapitulatif des résultats des essais mécaniques appliqués sur des bio-composites cimentaires biofibrés dont les fibres sont soumises à des différents traitements :

Bio-fibres	Traitements appliqués sur les Bio-fibres	Résultats des essais de Flexion en (MPa)	Résultats des essais de Compression en (MPa)
Diss	Non traité	3.73	14.29
	Hygrothermique (bouilli)	4.72	24.46
	Immersion en Eau de mer	12.47	14.79
Alfa	Non traité	3.55	21.67
	Hygrothermique (bouilli)	6.52	21.69
	Immersion en Eau de mer	9.36	15.54

III.1.13. Résistance mécanique des bio-composites d'argile à base de fibres d'Alfa et de Diss traitées (bouillis) et non traitées

Les résultats des résistances mécaniques (à la flexion et à la compression) des bio-composites d'argile renforcés par des fibres d'Alfa et de Diss traités et non traités sont représentés sur les figures 56 et 57 ci-dessus.

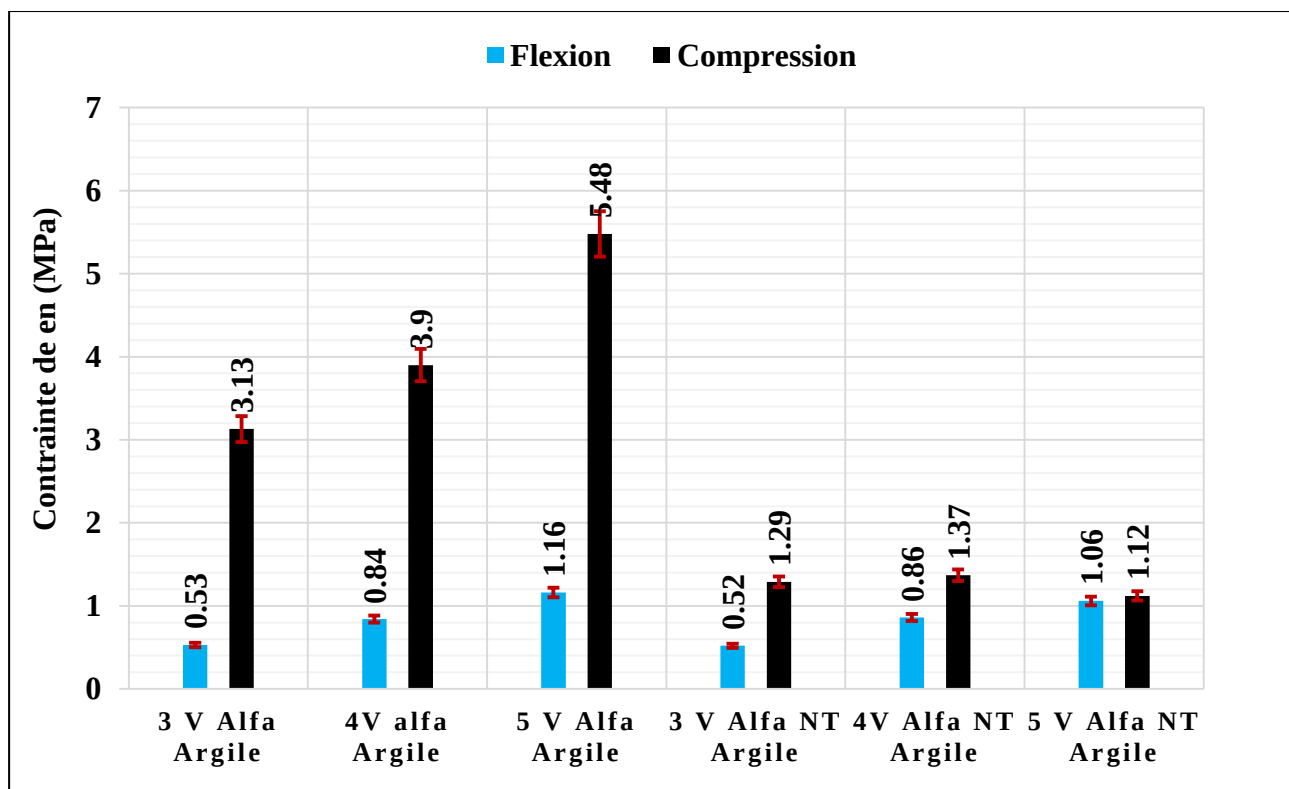


Figure 56: Résistances mécanique des bio-composites d'argile à base de fibres d'Alfa traitées et non traitées

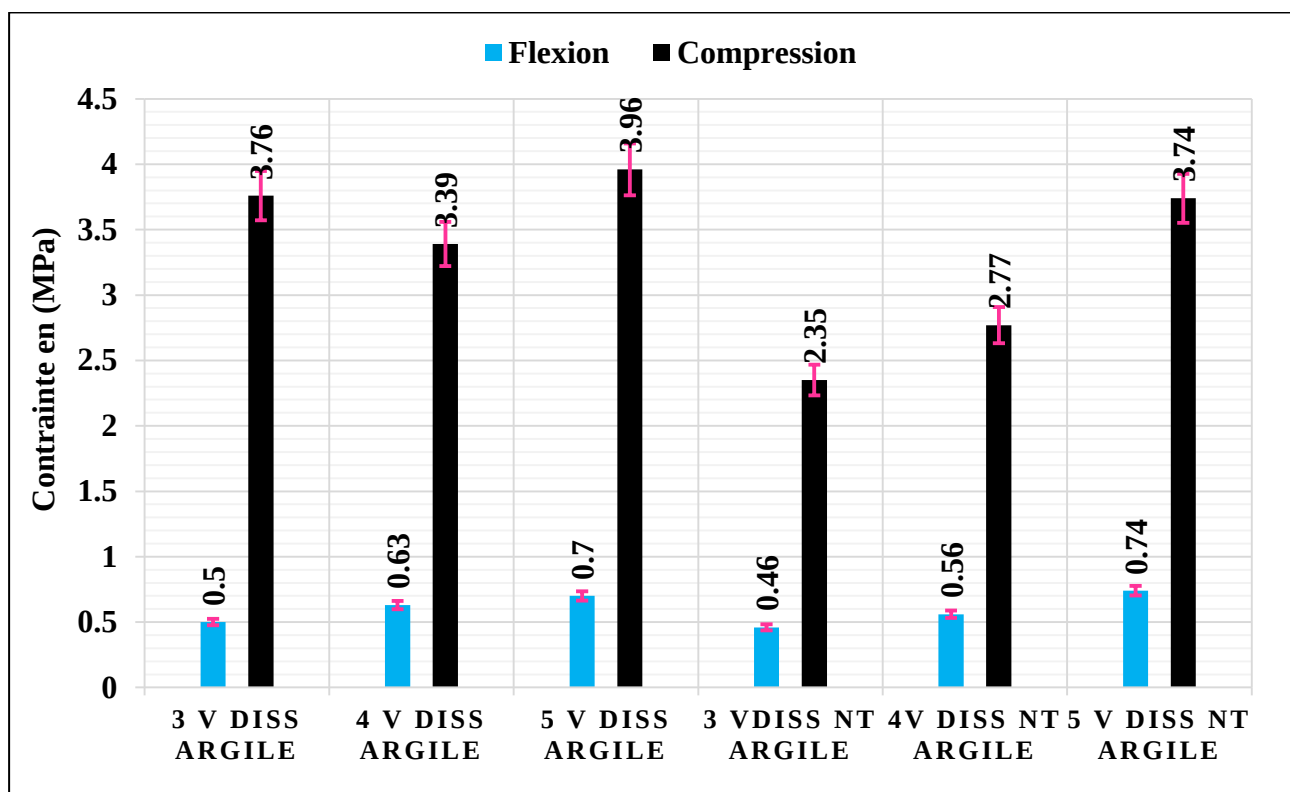


Figure 57: Résistances mécanique des bio-composites d'argile à base de fibres de Diss traitées et non traitées

Les résultats de la figures 56 montrent bien l'influence de l'ébullition des fibres sur les caractéristiques mécaniques des bio-composites d'argile renforcés par les fibres d'Alfa, où on constate une augmentation des résistances à la flexion et à la compression après diminution du taux de sucres et des composants hydrosolubles. Tandis que les résultats de la figure 57 ont présenté clairement que le traitement des fibres de Diss n'a aucune influence sur la résistance mécanique (en flexion et en compression) des bio-composites d'argile renforcées ces fibres.

D'après les résultats des essais mécaniques présentés sur les histogrammes des figures 56 et 57, nous avons constaté que la contrainte à la rupture croît avec l'augmentation du volume de renfort, c.à.d. que la meilleure formulation du composite argileux renforcé par l'Alfa et celle de Diss qui aura l'excellente résistance à la flexion et à la compression est celle qui correspond au rapport 5:1 volumes c.à.d. celui de cinq volumes de fibres contre un volume d'argile.

Les résultats de nos travaux sur les composites d'argile renforcés par des fibres de Diss ou d'Alfa sont respectivement de 0,74 MPa en flexion, de 3,96 MPa en compression et 1,16 MPa en flexion et 6,48 MPa en compression sont plus au moins fiable que ceux des résultats des études antécédentes.

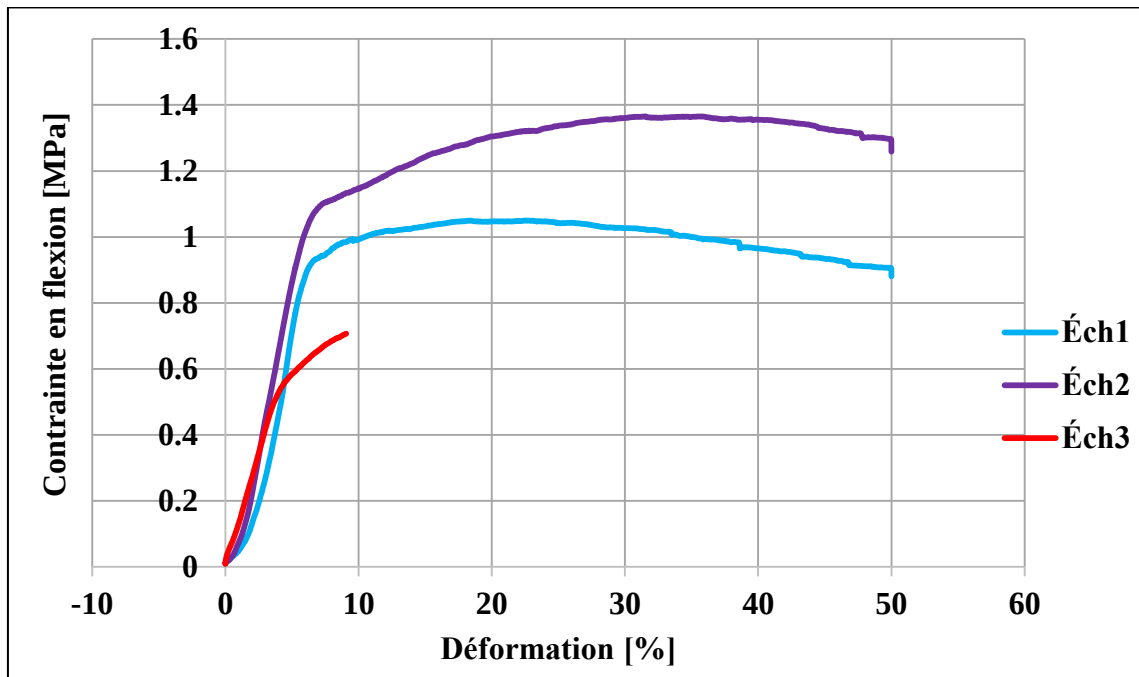


Figure 58 : .Diagrammes Contraintes-déformations des composites d'argile renforcés par des fibres d'Alfa broyé bouilli

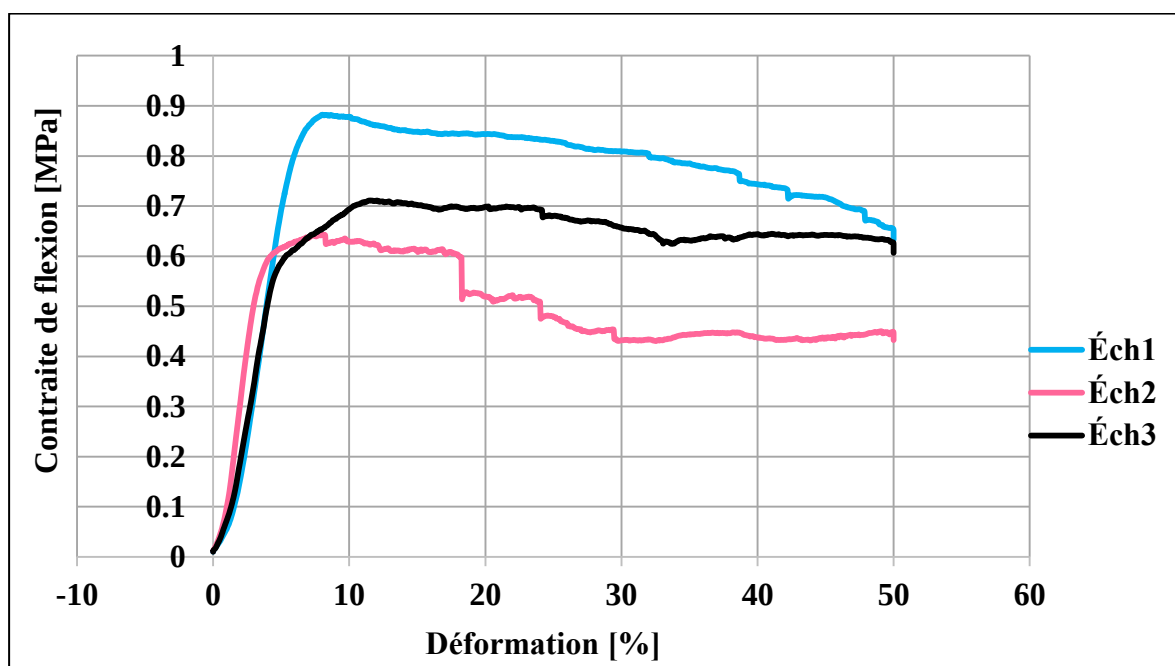


Figure 59 : Diagrammes Contraintes-déformations des composites d'argile et de chaux renforcés par des fibres de Diss broyé non traité

Les figures 58 et 59 présentent les diagrammes contrainte /déformation des résultats des essais appliqués sur les composites d'argile fibrés. Ces courbes montrent clairement que les matériaux élaborés présentent une déformation plastique, ce qui indique que l'ajout des fibres à ces matrices améliore l'élasticité de ces bio composites.

La déformation à la rupture du composite argileuse fibrée de ce travail est comparée à celle d'argile pure (Fertikh, et al. 2011)

III.1.14. Résistances mécanique des bio-composites à matrice composée de 50% d'argile et 50% de chaux renforcés par de fibres d'Alfa et de Diss traitées (bouillis) et non traitées

Les résultats des résistances mécaniques (à la flexion et à la compression) des bio-composites à matrice composée de 50% d'argile et 50% de chaux renforcés par de fibres d'Alfa et de Diss traités et non traités sont représentés sur les figures 60 et 61.

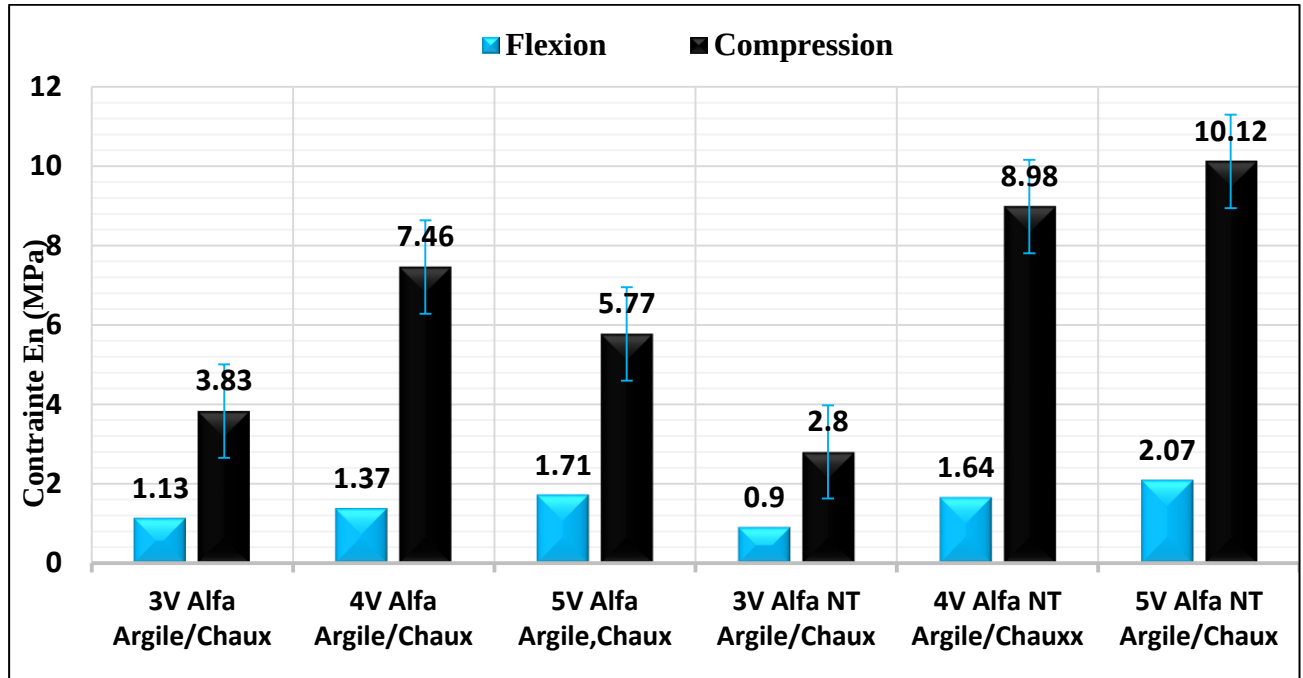


Figure 60: Résistances mécanique des bio-composites (50% d'argile et 50% de chaux) renforcés par de fibres d'Alfa traitées et non traitée.

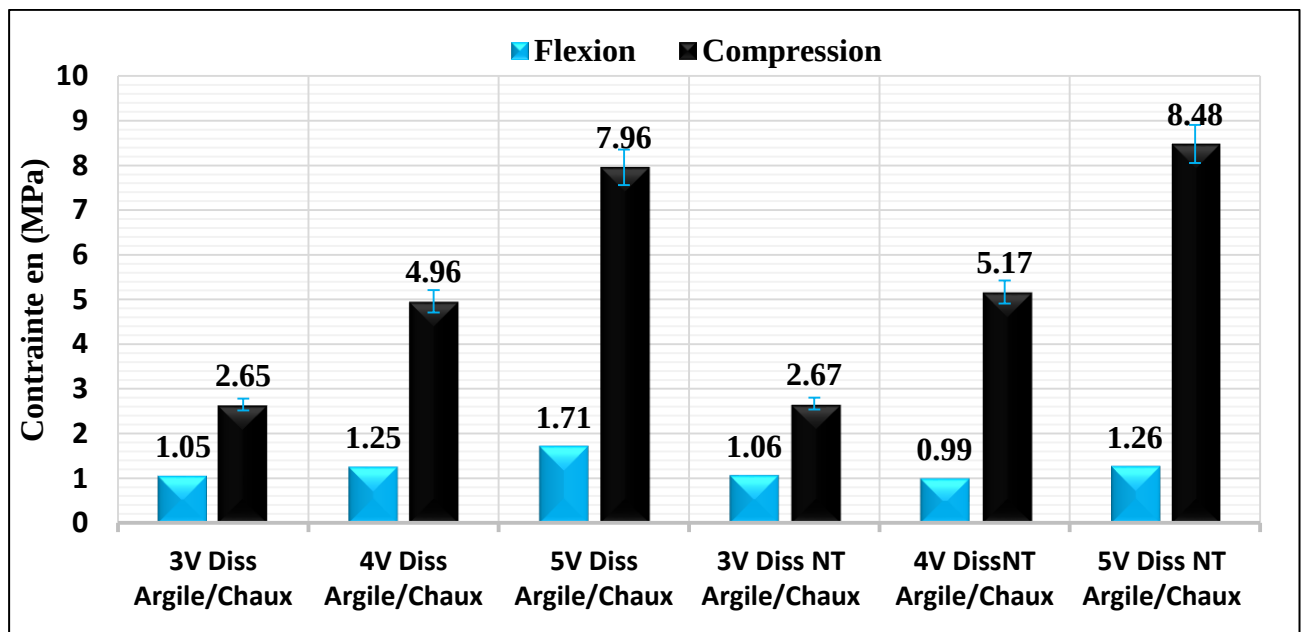


Figure 61: Résistances mécanique des bio-composites (50% d'argile et 50% de chaux) renforcés par de fibres de Diss traitées et non traitées

Les résultats montrés sur les figures 60 et 61 sont parfaitement convaincants, ils montrent que l'ébullition des différentes fibres de renfort n'a aucune influence sur la résistance mécanique (en flexion et en compression) des bio-composites à matrice composée d'argile et de chaux, où on constate les résistances à la flexion et à la compression les plus élevées sont celles des échantillons renforcés par les fibres (Alfa et Diss) non traitées.

Les résultats des essais mécanique présentés sur les histogrammes des figures 60 et 61 nous montrent que la contrainte à la rupture croît avec l'augmentation du volume de renfort, c.à.d. que la meilleure formulation du composite argileux renforcé par les fibres d'Alfa et de Diss qui aura l'excellente résistance à la flexion et à la compression est celle du rapport 5:1 volumes c.à.d. celui de cinq volumes de fibres contre un volume d'argile.

Les résultats des résistances mécanique des bio-composites à matrice composée de 50% d'argile et 50% de chaux renforcés par de fibres de Diss et d'Alfa (traitées et non traitées) sont plus élevées que celles des composites à matrice d'argile. On en déduit que l'ajout de la chaux à la matrice argileuse améliore les caractéristiques mécaniques, soit une augmentation de l'ordre de 231% en flexion et de 214% en compression des composites renforcés par des fibres de Diss, et de l'ordre de 178 % en flexion et de 64 % en compression des composites renforcés par des fibres d'Alfa.

La résistance à la flexion et à la compression des bio-composites renforcés par des fibres de Diss bouilli ou non bouilli ont presque les mêmes valeurs, c'est ce que justifie que l'ébullition n'a pas d'influence sur ces bio-composites.

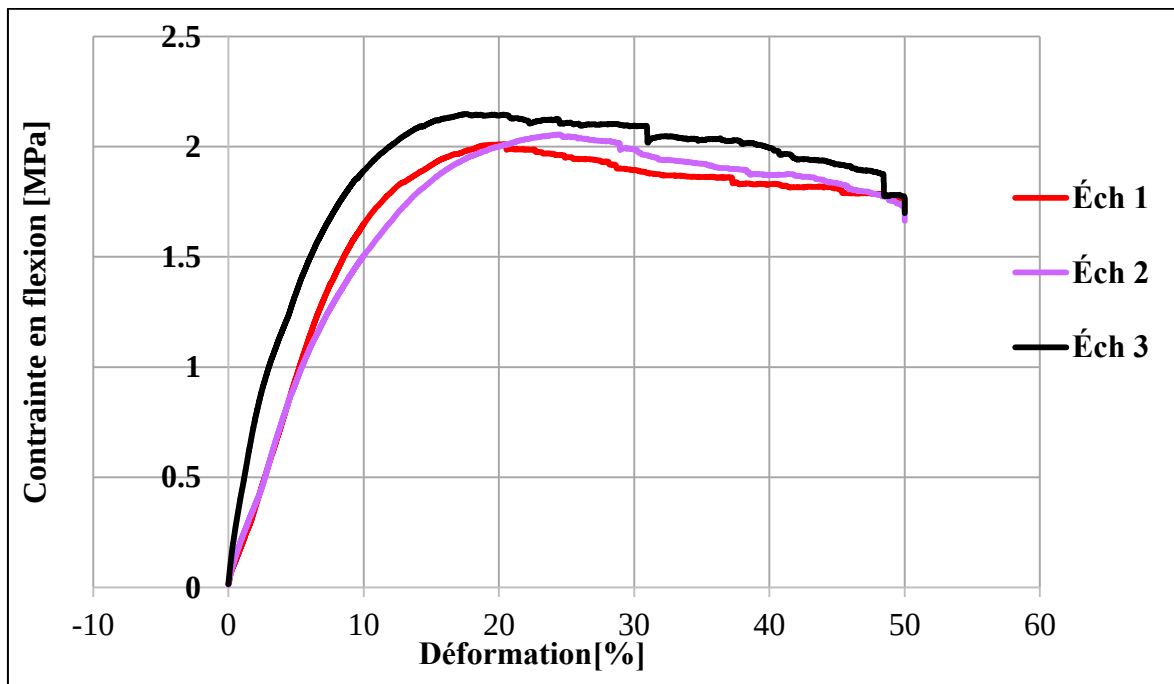


Figure 62 : .Diagrammes Contraintes-déformations des composites d'argile et de chaux renforcés par des fibres d'Alfa broyé non bouilli

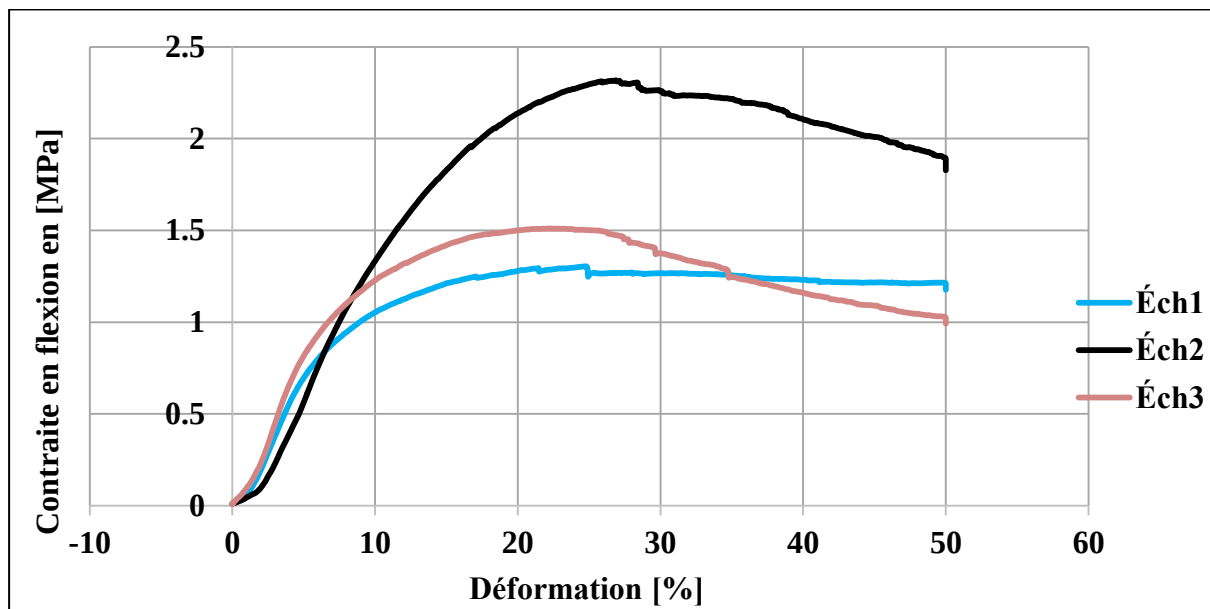


Figure 63: Diagrammes Contraintes-déformations des composites d'argile et de chaux renforcés par des fibres de Diss broyé non bouilli

Les contraintes à la rupture tirées des diagrammes contrainte-déformation des résultats des essais appliqués sur les composites d'argile et de chaux fibrés élaborés présentées sur les figures 62 et 63 montrent que ces biomatériaux ont eu une déformation plastique. Les taux de déformation à la rupture des composites d'argile et de chaux fibrés sont plus élevés que ceux des composites d'argile, cela affirme que l'ajout de la chaux à la matrice argileuse améliore sensiblement l'élasticité de ces bio composites ce qui confirme que :

L'alcalinité de la chaux, agit comme un agent de traitement des fibres.

La chaux possède des propriétés désinfectantes et hydrophobes qui aident à protéger les fibres végétales de l'humidité (Jones *et al.*2018).

Les résultats de la déformation à la rupture des différents bio composites, sont résumés sur le tableau 25.

III.1.15. Récapitulatif des résultats des essais mécaniques appliqués sur des bio-composites d'argile biofibrés dont les fibres sont soumises à des différents traitements

Les bio-composites à base de fibres végétales en raison de leur faible densité et de leur structure cellulaire, ont un potentiel élevé en matière d'isolation thermique et acoustique, ce qui représente un levier majeur pour la construction de bâtiments durables et à haute performance énergétique et pour la transformation du secteur de la construction

Suivant cette logique, l'intégration des bio-fibres vertes pour l'élaboration des bio-composites à matrice d'argile et à matrice composée d'argile et de chaux a pour but, d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques voire l'augmentation de la résistance à la flexion. Bien

évidemment tout cela doit impérativement rentrer dans le cadre du respect de l'environnement (réduire la consommation d'énergie et les émissions de carbone, ..., etc.) ainsi que la bonne gestion des déchets, et ce par le choix adéquat des traitements appliqués sur ces bio-matrices et bio-renforts.

Plusieurs variables notamment le taux, la forme du renfort ajouté à la matrice (taux de fibres découpées en brins ou broyées, ..., etc.) et également les traitements appliqués sur cette substance naturelle influent sur la résistance mécanique des bio-composites fibrés à matrice d'argile et à matrice composée d'argile et de chaux.

Pour l'obtention d'une meilleur formulation par un fiable traitement et un bon choix, équilibrer des proportions (quantités de fibres, de matrice, d'eau...etc.) et ce pour améliorer les caractéristiques des bio-composites fibrés élaborées dans cette contribution. Indépendamment de ces variables recommandées, il est aussi important de mettre en réseaux les résultats de cette recherche avec des résultats des études antérieures et similaires (résistances en flexion des composites d'argile fibrés varient entre 0.2 à 0.47 MPa et la déformation à la rupture varient entre 7.3 à 9.7 d'après la bibliographie. Il est important de noter que ces résultats sont plus ou moins faibles que ceux de notre recherche.

Le tableau 25 regroupe les meilleurs résultats des essais de résistances à la flexion trouvés sur les bio-composites à matrice d'argile et à matrice composée d'argile et de chaux, et leurs déformations à la rupture

Tableau 25: récapitulatif des résultats des essais mécaniques appliqués sur des bio-composites d'argile biofibrés dont les fibres sont soumis à des différents traitements :

Bio-fibres	Traitements appliqués sur les Bio-fibres	Résultats des essais de Flexion en (MPa)		Résultats des essais de Compression en (MPa)	
		Argile	Argile/chaux	Argile	Argile/chaux
Diss	Matrices				
	Non traité	0,74	1,26	3,74	8,48
	Déformation à la rupture [%]	9,2			
	Hygrothermique (bouilli)	0,70	1,71	3,96	7,96
Alfa	Déformation à la rupture [%]		24,64		
	Non traité	1,12	2,07	1,06	10,12
	Déformation à la rupture [%]		20,79		
	Hygrothermique (bouilli)	1,16	1,71	6,48	5,77
	Déformation à la rupture [%]	21,03			

➤ Quatrième Chapitre

Chapitre IV

IV. Durabilité

Ce chapitre est initié par une récapitulation des résultats des essais mécaniques obtenus auparavant, concernant l'étude de longévité et de durabilité, elle comprend les résultats des essais de résistances en flexion et en compression trouvés sur les bio-composites cimentaires fibrés après leur immersion dans des solutions agressives distinctes (eau de mer, NaOH).

IV.1.1. Longévité et résistance des composites fibrés immergés dans des milieux agressifs

Le contact direct avec de l'eau (contenant des acides, un degré de salinité et de pollution,...etc.) a toujours engendré des pathologies qui entraînent après un certain temps à la dégradation des éléments élaborés par ces amalgames cimentaires biofibrés. Les composites qualifiés pour être utilisés dans la construction doivent impérativement présenter une bonne conduite dans des milieux agressifs et ce pour s'assurer que ce bioproduit peut maintenir sa résistance dans le temps dans des conditions climatiques et environnementales plus allégées (moins agressive) (eau de pluies, eau vaporisée polluée, salinée ...etc.).



Figure 64: Des bio-composites cimentaires renforcées par des fibres d'Alfa et de Diss traitées (bouillis) et non traitées immergés dans l'eau de mer et dans NaOH 5%

IV.1.2. Résistances mécanique des bio-composites cimentaires renforcées par des fibres d'Alfa et de Diss traitées (bouillis) et non traitées immergés dans des milieux agressifs NaOH 5%

Les résultats des essais mécaniques sur les bio-composites immergés pendant 30 jours dans une solution d'NaOH à 5% de concentration renforcés par des fibres d'Alfa et de Diss traités et non traités sont tirés à partir des histogrammes présentés dans les figures 65 et 66.

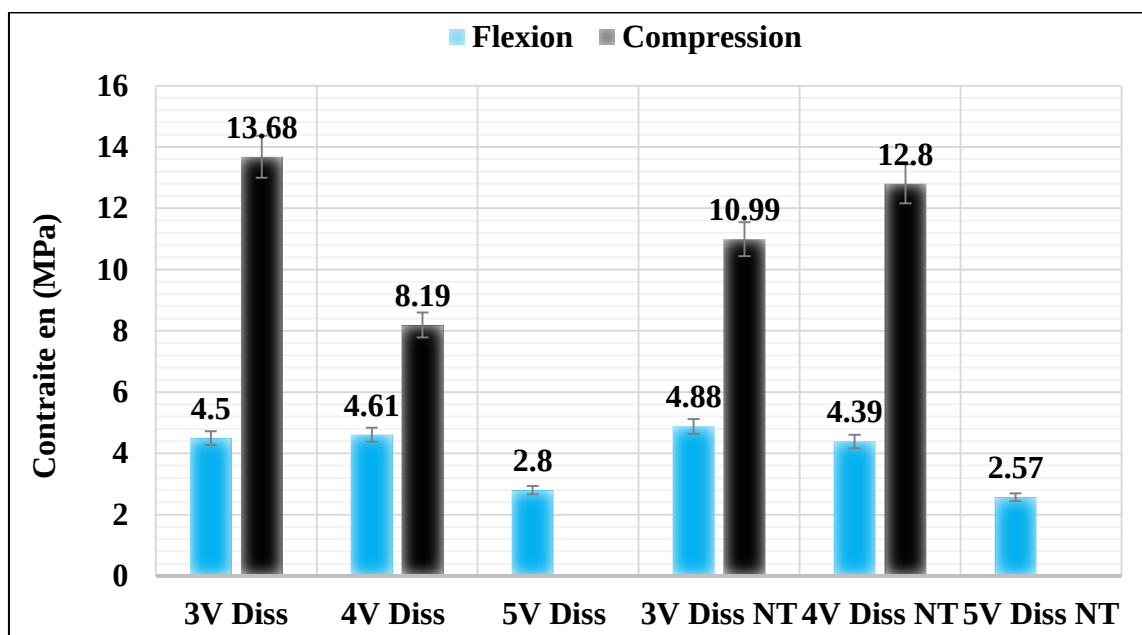


Figure 65: Résistance à la flexion et à la compression des bio-composites renforcés par les fibrés de Diss immergé en NaOH pendant 30 jours.

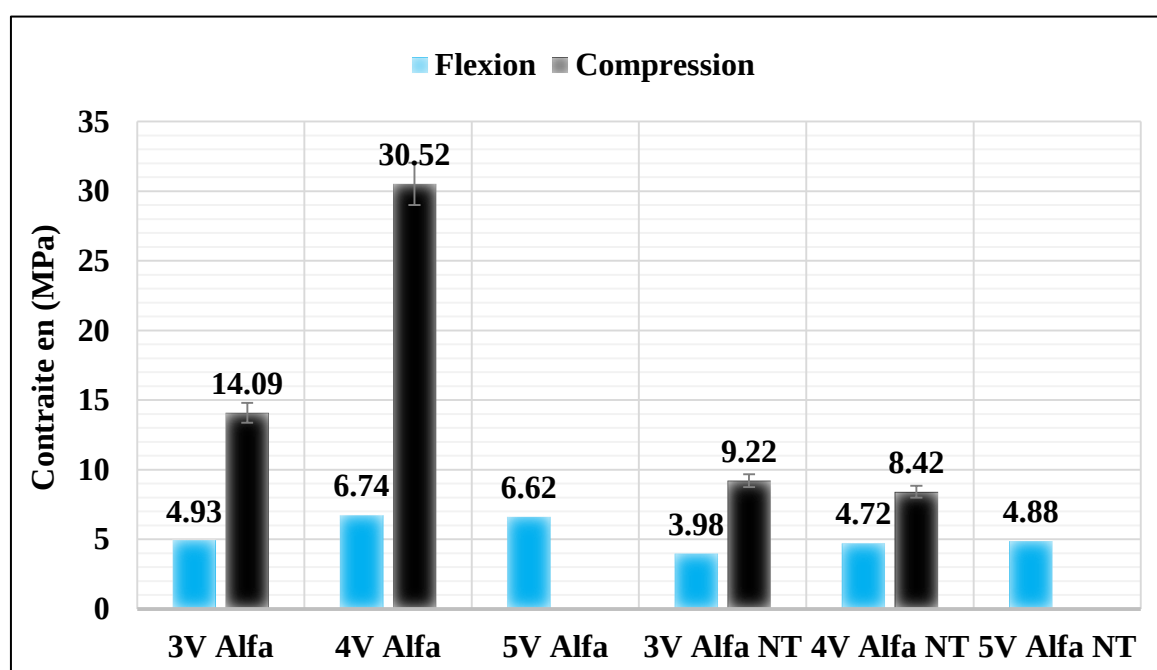


Figure 66: Résistance à la flexion et à la compression des bio-composites renforcés par les fibrés d'Alfa immergé en NaOH pendant 30 jours.

Les résultats tirés des histogrammes présentés sur les figures 65 et 66 montrent parfaitement une amélioration des caractéristiques mécaniques des bio-composites, où on constate une augmentation des résistances à la flexion et à la compression et ce après avoir immergé ces composites pendant 30 jours dans la solution de NaOH à 5% de concentration. L'estimation de cette augmentation sera montrée dans le tableau 26.

IV.1.3. Résistances mécanique des bio-composites cimentaires renforcées par des fibres d'Alfa et de Diss traitées (bouillis) et non traitées immergés dans des milieux agressifs en eau de mer

Les résultats des essais mécaniques sur les bio-composites immergés pendant 30 jours dans l'eau de mer renforcés par des fibres d'Alfa et de Diss traités et non traités sont reportés sur les histogrammes présentés les figures 67 et 68.

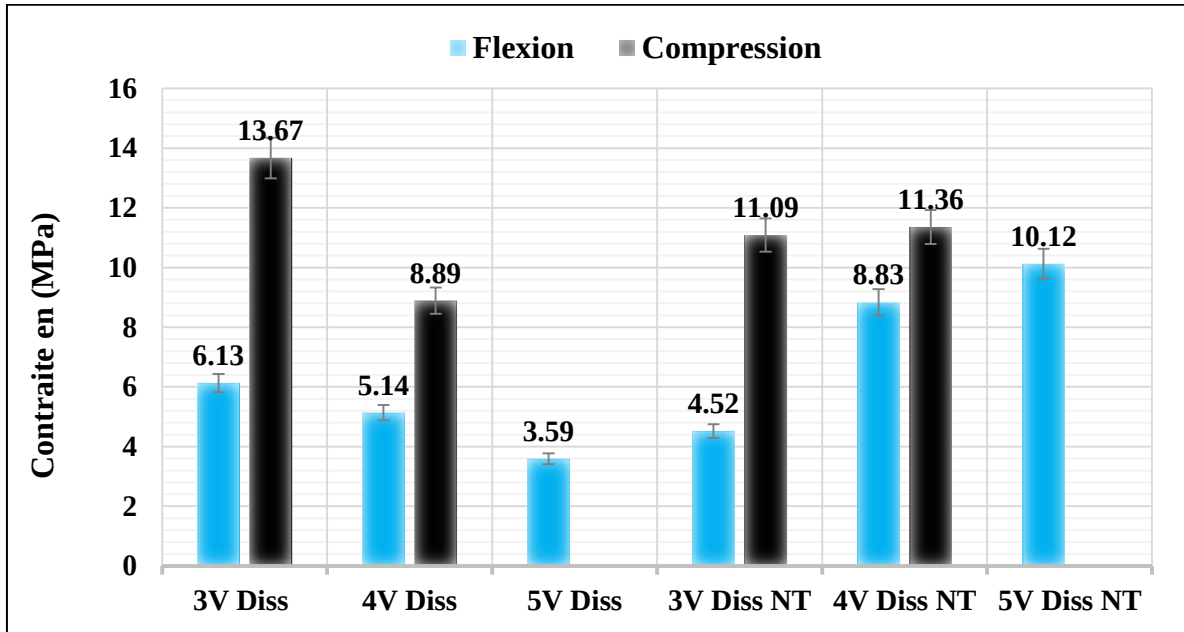


Figure 67: Résistance à la flexion et à la compression des bio-composites renforcés par les fibres de Diss immergés en Eau de mer pendant 30 jours.

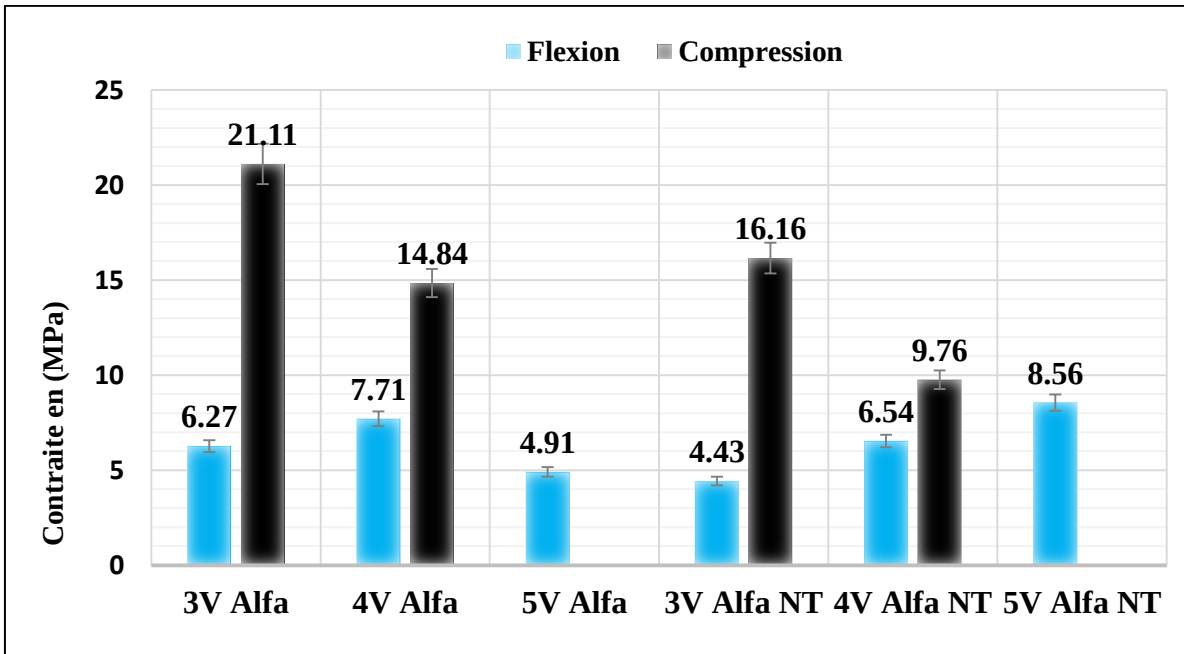


Figure 68: Résistance à la flexion et à la compression des bio-composites renforcés par les fibres d'Alfa immergés en eau de mer pendant 30 jours.

D'après les résultats des essais mécanique présentés sur les histogrammes présentés sur les figures 67 et 68 nous remarquons une nette amélioration des caractéristiques mécaniques des bio-composites, où on a constaté une augmentation remarquable des résistances à la flexion et à la compression et ce après avoir immergé ces composites pendant 30 jours dans l'eau de mer.

IV.1.4.Evaluation du comportement des bio composites cimentaires fibrée soumis dans des milieux agressifs

Pour évaluer le comportement des bio-composites en vis-à-vis du milieu agressif auxquels ils sont soumis, il est nécessaire d'établir un tableau qui regroupe tous les résultats trouvées des essais mécaniques (flexion et compression) appliqués sur des composites cimentaires biofibrés élaborés, immergés dans des milieux agressifs et les comparer avec les résultats des essais appliqués sur les composites non soumis à un milieu agressif.

Tableau 26: Regroupement des résultats des essais mécaniques appliqués sur des bio-composites cimentaires biofibrés immergés dans des milieux agressifs et ceux non soumis à un milieu agressif

Milieu agressif		Air libre	NaOH	Eau de mer	Air libre	NaOH	Eau de mer
Bio-fibres	Formulations Taux d'augmentation	Résultats des essais de Flexion en (MPa)			Résultats des essais de Compression en (MPa)		
Diss bouilli	3V	4,29	4,5	6,13	24,46	13,68	13,67
	Taux d'augmentation		7,23 %	42,89%		-44,07%	-44,07%
	4V	4,72	4,61 %	5,14 %	15,2	8,19 %	8,89
	Taux d'augmentation						%
	5V	4,13	2,8 %	3,59 %	1,31	-	-
	Taux d'augmentation						
Diss non bouilli	3V	3,73	4,88 %	4,52 %	14,29	10,99 %	11,09 %
	Taux d'augmentation						
	4V	3,66	4,39 %	8,83 %	9,99	12,8 %	11,36 %
	Taux d'augmentation						
	5V	1,48	2,57 %	10,12 %	1,18	-	-
	Taux d'augmentation						
	3V	4,22	4,93 %	6,27 %	21,69	14,09 %	21,11 %
	Taux d'augmentation						

Alfa bouilli	4V	4,46	6,74 %	7,71 %	20,02	30,52 %	14,84 %
	Taux d'augmentation						
	5V	6,52	6,62 %	4,91 %	10,59	-	-
	Taux d'augmentation						
Alfa non bouilli	3V	3,55	3,98 %	4,43 %	21,67	9,22 %	16,16 %
	Taux d'augmentation						
	4V	2,75	4,72 %	6,54 %	18,42	8,42 %	9,76 %
	Taux d'augmentation						
	5V	2,38	4,88 %	8,56 %	5,86	-	-
	Taux d'augmentation						

D'après les résultats mentionnés sur le tableau 26 on constate que les bio-composites immergés dans des milieux agressifs à court terme n'ont pas été influencé par ce milieu, mais leurs résistances mécaniques ont augmenté.

➤ Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif visé par cette recherche est d'améliorer les caractéristiques mécaniques des bio-composites fibrés, et ce afin de valoriser les fibres naturelles très répandues de la région Est de l'Algérie, tel que l'Alfa (*Stipa tenacissima*) et le Diss (*Amplidosma mauritanica*), et de les intégrer dans le secteur de la construction comme renfort dans des matrices cimentaires.

Les résultats des essais mécaniques (traction et compression) obtenus ont montré que :

- Les résistances des bio-composites renforcés par les fibres broyées et bouillies et les fibres broyées et immergées en eau de mer, sont plus élevées que celles des bio-composites renforcés par les fibres naturelles broyées.
- Les résistances à la flexion des bio-composites renforcés par des fibres (Alfa et Diss) broyées et immergées dans l'eau de mer sont plus élevées que celles renforcées par des fibres naturelles broyées et bouillies, tandis que ces valeurs sont nettement supérieures à la pâte de ciment, et aux bio-composites de fibres naturelles broyées, et présentent des comportements ductiles, contrairement à la pâte de ciment qui présente un comportement fragile.
- La résistance à la flexion des bio-composites renforcés par des fibres augmente avec la fraction volumique du renfort, tandis que leur résistance à la compression évolue de manière inverse. Ce comportement met en évidence le rôle des fibres dans la reprise des efforts de traction générés lors des sollicitations en flexion, ainsi que des contraintes latérales développées sous l'effet de la compression.
- Les résistances mécaniques des bio-composites renforcés par des fibres de Diss sont notablement élevées que celles renforcées par des fibres d'Alfa pour les différents traitements appliqués, à cause de la présence des épines sur la surface des fibres de Diss, qui augmentent l'adhérence entre les fibres et la pâte de ciment.
- Les résistances mécaniques des bio-composites renforcés par des fibres de Diss immergées dans l'eau de mer diminuent pour la résistance la flexion à partir de 30 jours d'immersion et pour la résistance de compression au-delà de 90 jours.
- La diminution des résistances mécaniques des bio-composites renforcés par des fibres d'Alfa et de Diss immergées dans l'eau de mer malgré l'absence des sucres solubles est dû probablement à la décomposition (biodégradation causée par les bactéries, les champignons et les microalgues qui se trouvent dans l'eau de mer) des éléments de la structure de ces deux espèces (cellulose ; lignine ; d'hémicellulose...etc.).
- Les résistances en flexion obtenues pour les bio-composites à fibres d'Alfa et de Diss immergées dans l'eau donnent de meilleures résistances que celles traitées à l'eau bouillie, ceci est dû à l'effet des sels contenus dans l'eau sur les quantités de sucres qu'elles contiennent.

- L'utilisation du ciment EL Matine n'a pas d'effet très défavorable sur les fibres naturelles non traitées contrairement aux résultats trouvés dans des études précédentes. Cela prouve que le ciment Matine interagit mieux avec les fibres naturelles.

Cette contribution vise aussi à valoriser l'intégration des matériaux bio-sourcés de la région (fibres végétales, argile, chaux...) dans les constructions.

Les résultats des essais mécaniques (flexion et compression) obtenus ont montré que :

- Les résistances des bio-composites à matrice argileuse renforcés par les fibres broyées d'Alfa bouillies, sont plus élevées que celles des bio-composites renforcés par les fibres de Diss broyées naturelles.
- la contrainte à la rupture des bio-composites à matrice argileuse renforcés par les fibres d'Alfa et de Diss croît avec l'augmentation du volume de renfort.
- l'ajout des fibres d'Alfa et de Diss à la matrices argileuse a amélioré l'élasticité de ces bio composites
- l'ajout de 50% de la chaux à la matrice argileuse améliore les résistances et augmente l'élasticité des bio-composites fibrés élaborés.
- les bio-composites immergés dans des milieux agressifs à court terme ne s'affectent pas et leurs résistances mécaniques augmentent

A partir de ces résultats il est à noter que :

- L'utilisation de l'argile comme liant dans les composites renforcés par des fibres végétales présente plusieurs avantages. Contrairement aux composites à matrice cimentaire, elle permet d'éviter le phénomène d'inhibition de l'hydratation du ciment, généralement provoqué par les sucres et les substances hydrosolubles présents dans les fibres végétales non traitées. Ce phénomène se traduit habituellement par un retard de prise et une diminution des performances mécaniques des composites cimentaires. Par ailleurs, l'incorporation de fibres végétales dans une matrice argileuse améliore les propriétés mécaniques du matériau, notamment sa résistance et sa capacité de déformation, en lui conférant une élasticité nettement supérieure à celle de l'argile pure. Ces caractéristiques font des bio-composites à matrice argileuse une alternative prometteuse pour les matériaux de construction durables.
- L'incorporation de chaux dans la matrice argileuse contribue à améliorer les performances mécaniques des composites, notamment en augmentant leur résistance et leur capacité de déformation (élasticité). Cette amélioration est principalement attribuée au caractère alcalin de la chaux, qui favorise les interactions entre la matrice et les fibres végétales. Par ailleurs, la chaux confère au composite une meilleure durabilité en limitant la dégradation

biologique des fibres végétales grâce à son environnement fortement alcalin, ce qui contribue à prolonger la durée de vie du matériau.

En définitive, les bio-composites renforcés par des fibres végétales, qu'ils soient à matrice cimentaire, argileuse ou à base d'un mélange argile–chaux, constituent une alternative prometteuse pour une construction moderne, durable et à faible impact environnemental. Grâce à leurs performances mécaniques, à leur faible densité et à l'utilisation de ressources renouvelables, ces matériaux contribuent à améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments tout en réduisant l'empreinte carbone du secteur de la construction.

Au-delà de ces avantages, les bio-composites offrent également une solution pertinente au problème de la gestion des coproduits végétaux. Contrairement à de nombreux matériaux de construction conventionnels, dont le recyclage est souvent complexe, coûteux, voire impossible, et dont certains peuvent présenter des risques pour la santé ou l'environnement en fin de vie. Les bio-composites présentent un meilleur potentiel de valorisation et une moindre incidence environnementale. Leur développement s'inscrit ainsi pleinement dans une démarche d'économie circulaire, en favorisant la réduction des déchets, la préservation des ressources naturelles et la limitation des impacts environnementaux liés au secteur de la construction.

Cette étude s'inscrit dans une démarche de recherche visant à améliorer les performances des bio-composites renforcés par des fibres végétales, afin d'accroître leur aptitude à répondre aux exigences techniques, environnementales et économiques du secteur de la construction. Cette contribution s'inscrit pleinement dans une vision de transition écologique, fondée sur le développement de matériaux de construction plus durables, à faible empreinte carbone et issus de ressources renouvelables. L'objectif est de proposer des alternatives crédibles aux matériaux conventionnels, tout en favorisant la réduction de la consommation des ressources naturelles non renouvelables, la valorisation des matières premières locales et la diminution des déchets générés par le secteur du bâtiment.

L'amélioration continue de ces bio-composites repose sur une meilleure compréhension des interactions entre les fibres végétales, les matrices minérales et les différents traitements ou additions susceptibles d'optimiser leurs propriétés mécaniques, thermiques, hygrothermiques et leur durabilité. À cet égard, la recherche scientifique joue un rôle essentiel dans la conception de formulations innovantes, l'identification des mécanismes de comportement des matériaux et l'évaluation de leurs performances à long terme dans des conditions réelles d'utilisation.

Par ailleurs, le développement et la généralisation de ces matériaux nécessitent une collaboration étroite entre les laboratoires de recherche, les industriels, les producteurs de matières premières et les acteurs du secteur de la construction. Cette synergie permettra d'accélérer le transfert des innovations vers des applications concrètes, d'optimiser les procédés de fabrication, de garantir la conformité aux exigences normatives et de favoriser l'intégration de ces bio-composites dans les pratiques constructives. Ainsi, cette étude ambitionne de contribuer au développement de solutions innovantes, performantes et durables, capables d'accompagner l'évolution du secteur de la construction vers une économie plus circulaire, plus résiliente et plus respectueuse de l'environnement.

➤ Perspectives

Perspectives envisagées

En tant que chercheur académique, je considère que l'intégration des bio-composites renforcés par des fibres végétales dans le secteur de la construction constitue une perspective de recherche particulièrement prometteuse, à l'interface de l'innovation technologique, de la durabilité environnementale et de l'ingénierie des matériaux. Le développement de ces matériaux biosourcés répond aux enjeux actuels de la transition écologique en proposant des solutions de construction plus respectueuses de l'environnement, tout en garantissant des performances techniques compatibles avec les exigences du bâtiment moderne.

Dans cette perspective, l'amélioration des propriétés mécaniques, physiques, thermiques et de la durabilité des bio-composites, ainsi que leur intégration dans les procédés de construction industrialisée, représentent un défi scientifique et technologique majeur. Ce défi implique une meilleure maîtrise des formulations, de l'interaction entre les fibres végétales et les matrices minérales, ainsi que des procédés de fabrication, afin de concevoir des matériaux fiables, compétitifs et facilement transférables à l'échelle industrielle. Relever ce défi constitue non seulement une opportunité de faire progresser les connaissances scientifiques, mais également une contribution concrète au développement de solutions constructives innovantes, durables et adaptées aux exigences de l'économie circulaire et de la neutralité carbone.

Cette thématique fait appel à plusieurs enjeux et pistes de recherches tel que :

- L'amélioration des propriétés mécaniques des bio-composites, restent un défi pour des applications à grande échelle (par l'industrialisation des constructions), cette perspective nécessite d'approfondir la recherche sur les traitements chimiques et thermiques des fibres, les processus de moulage et optimiser les formulations d'élaboration de ces biomatériaux. Car la plupart des études sur les fibres naturelles associées à des matrices cimentaires, ou autres ont montré qu'elles offrent une alternative en termes de poids, d'isolation thermique et acoustique, et de performance en matière de durabilité et écologique.
 - L'amélioration de la stabilité dimensionnelle et la longévité dans des conditions variables (l'humidité, les variations de température, les eaux de pluies et les cycles de gel-dégel....) pour ne pas altérer les propriétés des bio-composites et prolonger leur durée de vie dans des environnements de construction réels, et présentent une autre piste de recherche très importante.
 - Les bio-composites à base de fibres végétales présentent un atout majeur pour édifier des constructions et des bâtiments durables à haute performance énergétique (qui rentre dans le
-

contexte où l'efficacité énergétique des bâtiments devient une priorité), car elles possèdent un potentiel élevé en matière d'isolation thermique et acoustique. Pour de tels objectifs, il est important d'approfondir cette recherche qui pourrait permettre d'optimiser les formulations pour maximiser les performances thermiques et acoustiques exceptionnelles tout en gardant leur légèreté et manipulation facile.

- Les bio-composite en raison de leur faible densité et de leur structure cellulaire, peuvent offrir de meilleures performances d'isolation thermique et acoustique ce qui aide à développer des structures de panneaux ou de murs en bio-composites pour la construction modulaire ou préfabriquée, où la légèreté et la rapidité de mise en œuvre sont des facteurs clés. Cette alternative peut faire aussi l'objet de recherche sur les bio-composites auto-régénérant avec des propriétés antibactériennes qui pourrait ouvrir de nouvelles voies pour des matériaux de construction qui ne se contentent pas de remplir une fonction structurelle, mais participent également à l'amélioration du confort intérieur et de la qualité de l'air

- Jugées fructueuses, l'intégration des bio-composites dans le secteur de la construction et du bâtiment industrialisé, (sur les volets économique, environnemental et technique) nécessite de confirmer si ces bio-composites peuvent être recyclés, réutilisés ou biodégradés de manière efficace après leur utilisation. Cette confirmation pour être validée après l'utilisation de ces bio-composites dans la construction ou en fin de vie, cela exige une recherche sur les méthodes possible appliquées pour leur recyclage avec la possibilité de les réutiliser dans d'autres applications. De plus, il est impérativement recommandé de mener l'étude d'analyse du cycle de vie de ces biomatériaux pour déterminer l'empreinte carbone sur l'environnement et la comparer aux matériaux traditionnels.

- La recherche académique dans le domaine des bio-composite doit sortir des concepts de laboratoire aux concepteurs, entrepreneurs, fabricants de matériaux de construction et aux industriels à l'exécution, qui soumettront ce produit à grande échelle et à des conditions réelles. Ce transfert technologique contribue à développer ce produit et donne des solutions innovantes qui répondent aux besoins actuels de la construction moderne et durable. Ce transfert sert aussi à élaborer des normes qui certifient et puissent être adaptées à l'utilisation ces bio-composites dans la construction, en vue de garantir leur fiabilité et leur sécurité.

➤ Bibliographie

Bibliographie

- Aamr-Daya, E, Langlet, T and Benazzouk, A (2008). Feasibility study of lightweight cement composite containing flax by-product particles: physico-mechanical properties, *Cement and Concrete Composites* 30: 957–63. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.06.002>
- Achour, A., Ghomari, F., & Belayachi, N. (2017). Properties of cementitious mortars reinforced with natural fibers. *Journal of adhesion science and Technology*, 31(17), 1938-1962. <https://doi.org/10.1080/01694243.2017.1290572>
- Abdelmouleh, M., Boufi, S., Belgacem, M. N., & Dufresne, A. (2007). Short natural-fibre reinforced polyethylene and natural rubber composites: Effect of silane coupling agents and fibres loading. *Composites Science and Technology*, 67, 1627–1639. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.07>
- Acikel, H. (2011). The use of miscanthus (*Giganteus*) as a plant fiber in concrete production. *Scientific Research and Essays*, 6(13), 2660-2667. DOI : 10.5897/SRE10.1139
- Addi, M. (2008). *Caractérisation fonctionnelle d'une Beta-Xylosidase de lin (Linum usitatissimum L.) : Rôle(s) potentiel(s) dans le métabolisme pariétal* (Thèse de doctorat, Université de Lille I).
- Akkaoui, A. (2014). *Bétons de granulats de bois : Étude expérimentale et théorique des propriétés thermo-hydro-mécaniques par des approches multi-échelles* (Doctoral dissertation, Université Paris-Est).
- Akin, D. E., G. R. Gamble, W. H. Morrison III, L. L. Rigsby, et R. B. Dodd. (1996). Chemical and structural analysis of fiber and core tissues from flax. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 72, 155-165. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-010\(199611\)](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-010(199611))
- Al-Rim, K. (1999). Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay–cement–wood composites. *Cement and Concrete Composites*, 21(4), 269–276. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(99\)00008-2](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(99)00008-2)
- Alphand, G. (1989). Matériaux réfractaires et céramiques techniques (pp. 489–519). Édition Septima.
- Al-Rawas, A. A., & Goosen, M. F. A. (2006). *Expansive soils: Recent advances in characterization and treatment*. Taylor & Francis Group/Balkema.
-

- Ali, M. (2014). Seismic performance of coconut-fiber-reinforced-concrete columns with different reinforcement configurations of coconut-fiber ropes. *Construction and Building Materials*, 70, 226–230. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.108>
- Arabi, M., & Wild, S. (1989). Property changes induced in clay soils when using lime stabilization. *Municipal Engineer (London)*, 6(April), 85–99.
- Arnaud, L., & Gourlay, E. (2012). Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes. *Construction and Building Materials*, 28(1), 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.052>
- Arnold, J. C., & Alston, S. M. (2012). Life cycle assessment of the production and use of polypropylene tree shelters. *Journal of Environmental Management*, 94(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.036>
- Arrakhiz, F. Z., Malha, M., Bouhfid, R., Benmoussa, K., & Qaiss, A. (2012). Tensile, flexural and torsional properties of chemically treated alfa, coir and bagasse reinforced polypropylene. *Composites Part B: Engineering*, 47, 35–41. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.10.061>
- ArupFire & HSE. (2005). *Fire resistance of concrete enclosures: Work Packages 1, 2, 5 and 6 – Data collection, spalling categories, and heat transfer modeling in response to HSE design fires*. Health and Safety Executive.
- Aziz, M. A., Paramasivam, P., & Lee, S. L. (1981). Prospects for natural fibre reinforced concretes in construction. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 3(2), 123–132. [https://doi.org/10.1016/0262-5075\(81\)90023-9](https://doi.org/10.1016/0262-5075(81)90023-9)
- Badr, A., Ashour, A. F., & Platten, A. K. (2006). Statistical variations in impact resistance of polypropylene fiber-reinforced concrete, *International Journal of Impact Engineering*, 32(11), 1907–1920.
- Bahloul O., Bourzam A., Bahloul A., (2009). Utilisation des fibres végétales dans le renforcement de mortiers de ciment (Cas de l'alfa), *SBEIDCO - 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries*, ENSET Oran (Algeria), 12-14 October.

Baley, C. (2002). Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(7), 939-948. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(02\)00040-4](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(02)00040-4)

Baley, C., (2003). *Contribution à l'étude de matériaux composites à matrice organique renforcés par des fibres de lin* (Thèse d'HDR). Université de Bretagne Sud, Lorient, France.

Baley C., (2005). Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. *Techniques de l'ingénieur*, Réf : AM5 130.

Batra, S., (2006). Other Long Vegetable Fibers. In M. Lewin (Ed.), *Handbook of Fiber Chemistry* (3rd ed.). CRC Press.

Bederina. M, Gotteicha. M, Belhadj. B, Dheily. R. M, Khenfer. M., and Quéneudec. M., (2012). Drying shrinkage studies of wood sand concrete - Effect of different wood treatments. *Construction and Building Materials*, 36, 1066–1075.

Bederina. M, Laidoudi. B, Goullieux. A, Khenfer. M, Bali. A and Quéneudec. M., (2009). Effect of the treatment of wood shavings on the physico-mechanical characteristics of wood sand concretes. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1311–1315.

Belhamri. R., (2005). *Extraction des macromolécules pariétales des eaux de presse de betteraves sucrières : Etude de leur composition, de leurs propriétés physico-chimiques et de leur effet sur le process sucrier*, Thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne – Ardenne.

Bell F.G., (1996). Lime stabilization of clay minerals and soil. *Engineering Geology*, 42(4), 223–237.

Ben Mlik. Y., (2016). *Valorisation des fibres de kéraf dans des applications textiles et paratextiles*, Thèse de Doctorat, l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir.

Benmalek. M. L., Houari. H., Bali. A, and Quéneudec.M., (2000). Comportement d'un composite fine minérale - ciment - bois élaboré à l'aide de déchets industriels solides. *Sciences & Technologie*, 13, 65–72.

Beraldo. A. L., (1994). *Généralisation et optimisation de la fabrication d'une composite biomasse végétale-ciment à variations dimensionnelles limitées vis-à-vis des variations de l'humidité*, Thèse de doctorat, Université de Nancy I.

Berthelot J ; M., (2013). *Mécanique des Matériaux et Structures des Composites*, Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancés (ISMANS), Le Mans, Les Clousures.

Bikales, N. M., Segal. L., (1971). *Cellulose and Cellulose Derivatives*. Wiley Interscience, Part V, Vol. 5, 2nd ed., New York.

Bilba, K., & Arsene, M. A. (2008). Silane treatment of bagasse fiber for reinforcement of cementitious composites. *Composites part a: Applied science and manufacturing*, 39(9), 1488-1495. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.05.013>

Bledzki. AK, Faruk. O, Mamun AA., (2008). Influence of compounding processes and fibre length on the mechanical properties of abaca fibre-polypropylene composites. *Polimery-W*, 53(2), 120–125.

Bledzki AK, Faruk O, Specht K., (2007). Influence of separation and processing systems on morphology and mechanical properties of hemp and wood fiber reinforced polypropylene composites. *J Nat Fibers*, 4(3), 37–56.

Bouabid. R, Badraouf. M., (2016). Analyse quantitative des minéraux argileux des sols par la méthode des bilans chimiques associée à la diffraction des rayons X, (en ligne), <http://www.anafide.org/doc/HTE%2094/94-5.pdf>

Bouguerra. A., (1997). *Contribution à l'étude d'un procédé de valorisation de déchets argileux : Comportement hygrothermique des matériaux élaborés*, PhDthesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

Bourgeois, M., (2011). Fibres agrosourcées. *Techniques de l'ingénieur*.

Boustingorry. P., (2002). *Élaboration d'un matériau composite à matrice gypse et renfort bois fragmenté - Amélioration de la résistance au vissage de produits préfabriqués en gypse*, Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne et INPG de Grenoble.

Bozaci E, Sever K, Sarikanat M, Seki Y, Demir A, Ozdogan E, Tavman I., (2013). Effects of the atmospheric plasma treatments on surface and mechanical properties of flax fiber and adhesion between fiber–matrix for composite materials. *Compos Part B – Eng*, 45(1), 565–572.

Bürkle E, Scheel G, Damedde L., (2009). Energy-efficient processing of natural fibre reinforced plastics. *Kunstst Intern.*, 2, 25–29.

Cabane, N. (2004). *Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation* (Thèse de doctorat). École Nationale Supérieure des Mines de St-Étienne.

Carma. (n.d.). *Glossaire des matériaux composites*. Centre d'Animation Ceramic Society, 28, 183–192.

Carma. (2006). *Glossaire des matériaux composites renforcés de fibres d'origine renouvelable*. Centre d'animation régional des matériaux avancés, France.

Cérézo, V. (2005). *Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique* (Thèse de doctorat). Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

Chafei, S., F. Khadraoui, M. Boutouil, et M. Gomina. (2014). Optimizing the formulation of flax fiberreinforced cement composites. *Construction and Building Materials* 54, 659-664. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.038>

Chafei, S., Khadraoui, F., Boutouil, M., & Gomina, M., (2015). Effect of flax fibers treatments on the rheological and the mechanical behavior of a cement composite. *Construction and Building Materials*, 79, 229-235. (2015). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.091>

Charlet, K. (2008). *Contribution à l'étude de composites unidirectionnels renforcés par des fibres de lin : relation entre la microstructure de la fibre et ses propriétés mécaniques* (Thèse de doctorat). Université de Caen, France.

Cheumani, Y. (2009). Étude de la microstructure des composites bois/ciment par relaxométrie RMN du proton (Thèse de doctorat). Université Bordeaux 1 & Université de Yaoundé I.

Cheumani, Y. & Ndikontar, M. (2011). Probing of wood-cement interactions during hydration of wood-cement composites by proton low-field NMR relaxometry. *Journal of Materials Science*, 46(5), 1167–1175.

Coatanlem, P., Jauberthie, R., & Rendell, F. (2006). Lightweight wood chipping concrete durability. *Construction and Building Materials*, 20, 776–781.

Dallel, M. (2012). *Évaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (Stipa Tenacissima L.) : Caractérisation physico-chimique de la fibre au fil* (Thèse de doctorat). Université de Haute Alsace - Mulhouse.

Dalour, M. B. H. (2007). *The improvement of interfacial bonding, weathering and recycling of wood fibre reinforced polypropylene composites* (Thèse de doctorat). University of Waikato, Hamilton, New Zealand.

Davis, E. A., Derouet, C., Herve Du Penhoat, C., & Morvan, C. (1990). Isolation and an N.M.R. study of pectins from flax (*Linum usitatissimum* L.). *Carbohydrate Research*, 197, 205–215.

Dittenber, D. B., & GangaRao, H. V. (2012). Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 43(8), 1419-1429. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.11.019>

DuBois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical chemistry*, 28(3), 350-356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>

Dupain, R., & Saint-A., J.-C. (2009, février). Granulats, sols, ciment et béton : Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire.

El Hajj, N., Dheilly, R. M., Aboura, Z., Benmalek, M. L., & Quéneudec, M. (2009, juin). Composites 100 % végétaux : Effet de la granulométrie des étoupes de lin et de l'ajout des bios liants. 16èmes Journées Nationales sur les Composites, Toulouse.

El Hajj, N., Mboumba-Mamboundou, B., Dheilly, R. M., Aboura, Z., Benzeggagh, M., & Quéneudec, M. (2011). Development of thermal insulating and sound absorbing agrosourced materials from auto linked flax-tows. *Industrial Crops and Products*, 34(1), 921–928.

El-Hilali, A. (2009). *Étude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants (BAP) : Influence des fines calcaires et des fibres végétales* (Thèse de doctorat). Université de Cergy-Pontoise.

Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H.-P., & Sain, M. (2014). Progress report on natural fiber reinforced composites. *Macromolecular Materials and Engineering*, 299(1), 9–26.

Fertikh, S., Merzoud, M., Benazzouk, A., Douzane, O., & Langlet, T. (2011). Elaboration et caractérisation de composites à base de fibres naturelles de diss à matrice argile/chaux. *Récents Progrès en Génie des Procédés*, (101-2011). <https://www.proquest.com/openview/6a93c8e5d39a1e5dc970aa46d477c208/1?pq-origsite=gscholar&cbl=276222>

- Fertikh, S., Merzoud, M., Bounadja, M., Ghania, A., & Benazzouk, A. (2012, December). Caractéristiques mécaniques des composites à base de diss dans différentes matrices. In *Annales du Batiment et des Travaux Publics* (No. 6, p. 24). Editions ESKA. <https://www.proquest.com/openview/6a93c8e5d39a1e5dc970aa46d477c208/1?pq-origsite=gscholar&cbl=276222>
- Frehi, H., Couté, A., Mascarell, G., Perrette-Gallet, C., Ayada, M. et Kara, MH (2007). Dinoflagellés toxiques et/ou responsables de blooms dans la baie d'Annaba (Algérie). *Comptes Rendus Biologies*, 330 (8), 615-628. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2007.05.002>
- Gandini, ., & Belgacem, M. N. (2002). La chimie des substances renouvelables. *L'actualité Chimique*, 6–14.
- Gassan, J., & Gutowski, V. S. (2000). Effects of corona discharge and UV treatment on the properties of jute-fibre epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 60(15), 2857–2863.
- Gay, D. (1997). Matériaux composites. Éd. Hermès.
- Gay, D. (2005). Matériaux composites (5e éd.). HERMÈS-LAVOISIER.
- Gehring, F. (2013). Étude du comportement mécanique et de l'endommagement de composites thermoplastiques renforcés de fibres courtes de chanvre : Approche expérimentale et modélisation (Thèse de doctorat). École Nationale d'Ingénieurs Metz, Université de Lorraine, France.
- George, J., Sreekala, M. S., & Thomas, S. (2001). A review on interface modification and characterization of natural fiber reinforced plastic composites. *Polymer Engineering & Science*, 41(9), 1471–1485.
- Gornet, L. (2008). Généralités sur les matériaux composites. École Centrale Nantes. <http://hal.archives-ouvertes.fr>
- Gouasmia, N., Merzoud, M. (2025). Improvement of the mechanical properties of cementitious bio-composites reinforced with green bio-fibers: effect of the pretreatment parameters. *Proceedings on Engineering Sciences* 7(3):1569-1582.
DOI : 10.24874/PES07.03.018ISBN : 2683-4111

Govin, A. (2004). *Aspects physico-chimiques de l'interaction bois-ciment : Modification de l'hydratation du ciment par le bois* (Thèse de doctorat). École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne.

Govin, A., Peschard, A., & Guyonnet, R. (2006). Modification of cement hydration at early ages by natural and heated wood. *Cement and concrete composites*, 28(1), 12-20. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.09.002>

Hamza, S., Saad, H., Charrier, B., Ayed, N., & Charrier-El Bouhtoury, F. (2013). Physico-chemical characterization of Tunisian plant fibers and its utilization as reinforcement for plaster based composites. *Industrial Crops and Products*, 49, 357–365.

Hearle, J. W. S. (1963). The fine structure of fibers and crystalline polymers. III. Interpretation of the mechanical properties of fibers. *Journal of applied polymer science*, 7(4), 1207-1223. <https://doi.org/10.1002/app.1963.070070403>

Hepworth, D. G., Bruce, D. M., Vincent, J. F. V., & Jeronimidis, G. (2000). The manufacture and mechanical testing of thermosetting natural fibre composites. *Journal of Materials Science*, 35, 293–298.

Hill, C. A., Khalil, H. A., & Hale, M. D. (1998). A study of the potential of acetylation to improve the properties of plant fibres. *Industrial Crops and Products*, 8(1), 53-63. [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(97\)10012-7](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(97)10012-7)

Hidouci, S., Abbès, A., & Djebbar, A.B. (2018). Évaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux littorales de la ville d'Annaba. *Algerian Annals of Agronomy*, 30(2), 31–40.

Hourdet, D., & Muller, G. (1991). Solution properties of pectin polysaccharides — III: Molecular size of heterogeneous pectin chains. *Carbohydrate Polymers*, 16, 409–432.

Jean Luc Toupe. (2015). *Optimisation des propriétés mécaniques de composites à base de fibres naturelles : Application à un composite de fibre de lin avec un mélange de polyéthylène/polypropylène d'origine postconsommation* (Thèse de doctorat). Québec, Canada.

Pascault, Jean-Pierre., Sautereau, H., Verdu, J., & Williams, R. J. J. (2002). *Thermosetting Polymers*. New York: Marcel Dekker.

- John, M. J., & Thomas, S. (2008). Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate polymers*, 71(3), 343-364. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.05.040>
- John, M. J., & Anandjiwala, R. D. (2008). Recent developments in chemical modification and characterization of natural fiber-reinforced composites. *Polymer composites*, 29(2), 187-207. <https://doi.org/10.1002/pc.20461>
- Jonathan Page. (2017). *Formulation et caractérisation d'un composite cimentaire bio-fibré pour des procédés de construction préfabriquée* (Thèse de doctorat). Université de Caen Normandie.
- Jones, A., et al. (2018). Effects of lime addition on the mechanical properties of clay-fiber composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(4), 1–9.
- Jorge, F. C., Pereira, C., & Ferreira, J. M. F. (2004). Wood-cement composites: A review. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 62(5), 370–377.
- Juarez, C., Duran, A., Valdez, P., & Fajardo, G. (2007). Performance of “Agave lecheguilla” natural fiber in portland cement composites exposed to severe environment conditions. *Building and environment*, 42(3), 1151-1157. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.12.005>
- Kato, Y., & Watanabe, T. (1993). Isolation and characterization of a xyloglucan from Gobo (*Arctium lappa* L.). *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 57(9), 1591–1592.
- Khattab, S. A. A., Al-Mukhtar, M., & Fleureau, J. M. (2002). Effect of initial suction on the swelling pressure and porosity of lime-stabilised clays. *Proceedings of 3rd International Conference on Unsaturated Soils*, Recife, Brazil, Vol. 2, 605–609.
- Khattab, S. A. A., Al-Mukhtar, M., & Fleureau, J. M. (2007). Long-term characteristics of a lime treated plastic soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(4), 358–366.
- Khazma, M., El Hajj, N., Goullieux, A., Dheilly, R. M., & Queneudec, M. (2008). Influence of sucrose addition on the performance of a lignocellulosic composite with a cementious matrix. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(12), 1901-1908. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.09.014>

- Khazma, M., Goullieux, A., Dheilly, R. M., Rougier, A., & Quéneudec, M. (2014). Optimization of flax shive–cementitious composites: Impact of different aggregate treatments using linseed oil. *Industrial Crops and Products*, 61, 442–452.
- Kriker, A., Debicki, G., Bali, A., Khenfer, M., & Chabannet, M. (2005). Mechanical properties of date palm fibers and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate. *Cement and Concrete Composites*, 27, 554–564.
- Kuga, S., & Brown, R. M. (1988). *Carbohydrate Research*, 180, 345–350.
- Lalli, C. M., & Parsons, T. R. (2018). *Biological Oceanography: An Introduction*. Butterworth-Heinemann.
- Lasledj, A. (2009). *Traitement des sols argileux à la chaux : processus physico-chimique et propriétés géotechniques* (Thèse de doctorat). Université d'Orléans.
- Lazko, J., Dupré, B., Dheilly, R. M., & Quéneudec, M. (2011). Biocomposites based on flax short fibres and linseed oil. *Industrial crops and products*, 33(2), 317-324. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.11.015>
- Le Ngoc T. Huyen, Quéneudec, M., Remond, C., Chabbert, B., & Dheilly, R. M. (2011). Saccharification of *Miscanthus × giganteus*, incorporation of lignocellulosic by-product in cementitious matrix. *Comptes Rendus Biologies*, 334(11), 837.e1–837.e11.
- Ledhem, A. (1997). *Contribution à l'étude d'un béton de bois : Mise au point d'un procédé de minimisation des variations dimensionnelles d'un composite Argile-Ciment-Bois* (Thèse de doctorat). INSA de Lyon.
- Ledhem, A., Dheilly, R. M., Benmalek, M., & Queneudec, M. (2000). Minimisation de la sensibilité à l'eau de composites cimentaires argile-schistes-bois. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(1), 101-111.
- Liétard, O. (1977). *Contribution à l'étude des propriétés physicochimiques, cristallographiques et morphologiques des kaolins* (Thèse de doctorat en sciences). INPL Nancy.
- Liu, W., Jiang, H., & Yu, H. (2015). Thermochemical conversion of lignin for functional materials: A review and future directions. *Green Chemistry*, 17, 4888–4907.

Locat, J., Tremblay, H., & Lerouel, S. (1996). Mechanical and hydraulic behavior of a soft inorganic clay treated with lime. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(4), 654–669.

Magniont, C. (2010). *Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources* (Thèse de doctorat). Université de Toulouse.

Martin, A. R., Manolache, S., Mattoso, L. H. C., Rowell, R. M., & Denes, F. (2000, May). Plasma modification of sisal and high-density polyethylene composites. In *Proceedings from the Third International Symposium on Natural Polymers and Composites, São Paulo, Brazil*.

Marzano, M., & Pascal, C. (2014). Les matériaux composites. ANFA, Dossier pédagogique.

Maya Jacob John, & Anandjiwala, R. D. (2008). Recent developments in chemical modification and characterization of natural fiber-reinforced composites. *Polymer Composites*, 187–207.

Mboumba-Mamboundou, L. B., Dheilly, R. M., & Quéneudec, M. (2013). Valorization of beet pulps issued from sugar extraction in cementitious matrices: Effect of original pulp state. *Chemistry and Materials Research*, 4, 1–5.

Menadi, S., et al. (2013). Étude de la faisabilité d'un composite à matrice cimentaire renforcé de fibres de jute. *Revue des Sciences et Technologies, Synthèse*, 27, 40–49.

Merabet, D., & Belkacemi, H. (2003). Caractérisation minéralogique et chimique du kaolin de Tamazert (Algérie). *Annales de Chimie – Science des Matériaux*, 28(5), 61–83.

Merzoud, M. (2007). *Élaboration et caractérisation d'un matériau composite à base de fibres de diss dans la fabrication de la maçonnerie* (Thèse de doctorat d'État). Université Badji Mokhtar.

Merzoud, M., Dheilly, R. M., Goullieux, A., Queneudec, M., & Habita, M. F. (2008). Optimization of lignocellulosic composite formulated with a local resource: The Diss (*Ampelodesma mauritanica*). In 7th International Congress, Dundee, UK (pp. 651–660). IHS BRE Press.

Merzoud, M., & Habita, M. F. (2008). Élaboration et caractérisation des composites cimentaires avec des fibres de diss comme unités de maçonnerie. *Asian Journal – Building and Housing*, 9(4), 367–377.

Microsoft® Encarta®. (2007). © 1993–2006.

- Migneault, S., Koubaa, A., Erchiqui, F., Chaala, A., Englund, K., & Wolcott, M. P. (2009). Effects of processing method and fiber size on the structure and properties of wood–plastic composites. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 40(1), 80–85.
- Monreal, P. (2007). Étude de faisabilité de bétons lignocellulosiques à base de pulpes de betteraves (Thèse de doctorat). Université de Picardie Jules Vernes.
- Monreal, P., Dheilly, R. M., & Quéneudec, M. (2011). Effects of aggregate coating on the hygral properties of lignocellulosic composites. *Cement and Concrete Composites*, 33(2), 301–308.
- Mougel, E. (1992). *Mise au point d'un composite ciment-bois dont les variations dimensionnelles vis-à-vis des variations d'humidité sont contrôlées* (Thèse de doctorat). Université de Nancy I.
- Morteza, K., & Ganjian, E. (2011). Comparing flexural behaviour of fibre–cement composites reinforced with bagasse: Wheat and eucalyptus. *Construction and Building Materials*, 25, 3661–3667.
- Müssig, J., Martens, R., & Harig, H. (1999). The influence of harvesting, preparation and processing techniques on the properties of hemp needle felt reinforced. *Proceedings of 2nd International Wood and Natural Fibre Compositesymposium*.
- Neel, J. (Éd.). (1965). *Exposés de chimie macromoléculaire : Structure chimique des polyosides*. Paris : Gauthier-Villars.
- Nguyen, T. T. (2010). *Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre* [Thèse de doctorat, Université de Bretagne Sud].
- Nozahic, V. (2012). *Vers une nouvelle démarche de conception des bétons de végétaux lignocellulosiques basée sur la compréhension et l'amélioration de l'interface liant/végétal : application à des granulats de chenevotte et de tige de tournesol associés à un liant ponce/chaux* [Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II].
- Nozahic, V., & Amziane, S. (2012). Influence of sunflower aggregates surface treatments on physical properties and adhesion with a mineral binder. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 43(11), 1837–1849.

Norme Algérienne (NA442-2013) et Européenne (EN 197-1). (2013). *Certifiant ciment gris portland au calcaire*.

Norme NF EN 196-1. (n.d.). *Résistances mécaniques (flexion, compression) sur prismes*.

Norme NF P 15-433. (1994). *Méthodes d'essais des ciments - Détermination du retrait et du gonflement*. Comité Européen de Normalisation (CEN), AFNOR.

Nyström, B. (2007). *Natural fiber composites : Optimization of microstructure and processing parameters* [Doctoral thesis, Lulea University of Technology].

Ochi, S. (2008). Mechanical properties of kenaf fibers and kenaf/PLA composites. *Mechanics of Materials*, 40(4–5), 446–452.

Olesen, P. O., & Plackett, D. V. (1999). Perspectives on the performance of natural plant fibers.

Paiva, M. C., Ammar, I., Campos, A. R., Cheikh, R. B., & Cunha, A. M. (2006). Alfa fibers: Mechanical, morphological and interfacial characterization. *Composites Science and Technology*, 67, 1132–1138.

Pigman, W., & Horton, D. (1970). *The carbohydrates*. New York: Academic Press.

Rabii, H. (2016). *Etude du vieillissement de composites renforcés par des fibres naturelles : application bâtiment* [Thèse de doctorat, Université Paris-Est].

Ragoubi, M. (2010). *Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne* [Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy 1].

Ragoubi, M., Bienaime, D., Molina, S., George, B., & Merlin, A. (2010). Impact of corona treated hemp fibers onto mechanical properties of polypropylene composites made thereof. *Industrial Crops and Products*, 31(2), 344–349.

Ramezani pour, A. A., Esmaeili, M., Ghahari, S. A., & Najafi, M. H. (2013). Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristics of concrete for application in sleepers. *Construction and Building Materials*, 44, 411–418.

Reyne, M. (1990). *Technologie des composites*. Traité des nouvelles technologies. Série Matériaux ; Hermès.

- Rihouey, C., Morvan, C., Borissova, I., Jauneau, A., Demarty, M., & Jarvis, M. (1995). Structural features of CDTA-soluble pectins from flax hypocotyls. *Carbohydrate Polymers*, 28(2), 159-166. [https://doi.org/10.1016/0144-8617\(95\)00094-1](https://doi.org/10.1016/0144-8617(95)00094-1)
- Riley, J. P., & Chester, R. (1971). *Introduction to marine chemistry*. Academic Press.
- Ritter, S. K. (2008). Lignocellulose: A complex biomaterial. *Chemical & Engineering News*, 86, 15.
- Ruch, J., Fritz, H.-G., Bürkle, E., & Zimmet, R. (2002). Innovative direct processing of natural fibers: Fibres for reinforcing polypropylene. *Kunststoffe-Plast Europe*, 92(2), 11–14.
- Saidane, K. (2014). *Analyse des composites sandwichs et qualification de leur intégrité vis-à-vis de la ruine* [Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou].
- Sarkanen, K. V., & Ludwig, C. H. (Eds.). (1971). *Lignins: Occurrence and formation, structure, chemical and macromolecular properties, and utilization*. Interscience.
- Sedan, D. (2007). *Étude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment : Influence sur les propriétés mécaniques du composite* [Thèse de doctorat, Université de Limoges].
- Sedan, D., Pagnoux, C., Smith, A., & Chotard, T. (2008). Mechanical properties of hemp fiber reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction. *Journal of the European Ceramic Society*, 28, 183–192.
- Segad, M., Jonsson, B., Åkesson, T., & Cabane, B. (2010). Ca/Na montmorillonite: Structure, forces and swelling properties. *Langmuir*, 26(8), 5782–5790.
- Service de la santé et de la sécurité du travail – Service du répertoire toxicologique. (2004). *Amiante*. Canada.
- Shaoxiong, L. (2012). *Étude de comportement en fatigue des composites renforcés par fibres végétales : Prise en compte de la variabilité des propriétés* [Thèse de doctorat, Université de Bourgogne].
- Sharma, S. D., & Singh, G. (2013). Enantioseparation of Efavirenz by ultra-performance liquid chromatography. *Advances in Analytical Chemistry*, 3, 29–33.

Sherely Annie, P., et al. (2008). Effect of fiber loading and chemical treatments on thermophysical properties of banana fiber/polypropylene commingled composite materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(8), 1582–1588.

Silva, N. (2008). *État de la connaissance scientifique sur les fibres végétales*. FRD (Fibres Recherche Développement).

Taj, S., Munawar, M. A., & Khan, S. (2007). Natural fiber-reinforced polymer composites. *Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences*, 44(2), 129. https://www.academia.edu/Natural_fiber-reinforced_polymer_composi.pdf

Soroushian, P., Won, J. P., & Hassan, M. (2013). Durability and microstructure analysis of CO₂-cured cement-bonded wood particleboard. *Cement and Concrete Composites*, 41, 34-44. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.04.014>

Tamba, S. Voumbo, L. M., Wereme, A., Gaye, S., & Sissoko, G. (2007). Durabilité des bétons légers à base de copeaux de bois. *Journal des Sciences*, 7, 67–72.

Tan, P., Tong, L., & Steven, G. P. (1997). Modelling for predicting the mechanical properties of textile composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 28A, 903–922.

Tran Le, A. D. (2010). *Étude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment* [Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne].

Toledo Filho, R. D., de Andrade Silva, F., Fairbairn, E. M. R., & de Almeida Melo Filho, J. (2009). Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates. *Construction and building materials*, 23(6), 2409-2420. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.10.012>

Tolêdo Filho, R. D., Ghavami, K., England, G. L., & Scrivener, K. (2003). Development of vegetable fibre–mortar composites of improved durability. *Cement and concrete composites*, 25(2), 185-196. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00018-5)

Tolêdo Filho, R. D., Scrivener, K., England, G. L., & Ghavami, K. (2000). Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. *Cement and concrete composites*, 22(2), 127-143. DOI: [10.1016/S0958-9465\(99\)00039-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(99)00039-6)

Van de Weyenberg, I., Truong, T. C., Vangrimde, B., & Verpoest, I. (2006). Improving the properties of UD flax fibre reinforced composites by applying an alkaline fibre

treatment. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(9), 1368-1376.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.08.016>

Villarreal, M. O., Hernández, E. A., Arispuro, I. V., & Téllez, M. M. (2012). Plant cell wall polymers: Function, structure and biological activity of their derivatives. In *Materials Science : Polymerization* (pp. 64–86).

Villieras, F. (2008). *Argiles : Histoire d'avenir*. Paris : Les Éditions Créateurs.

Walker, R., Pavia, S., & Mitchell, R. (2014). Mechanical properties and durability of hemp-lime concretes. *Construction and Building Materials*, 61, 340–348.